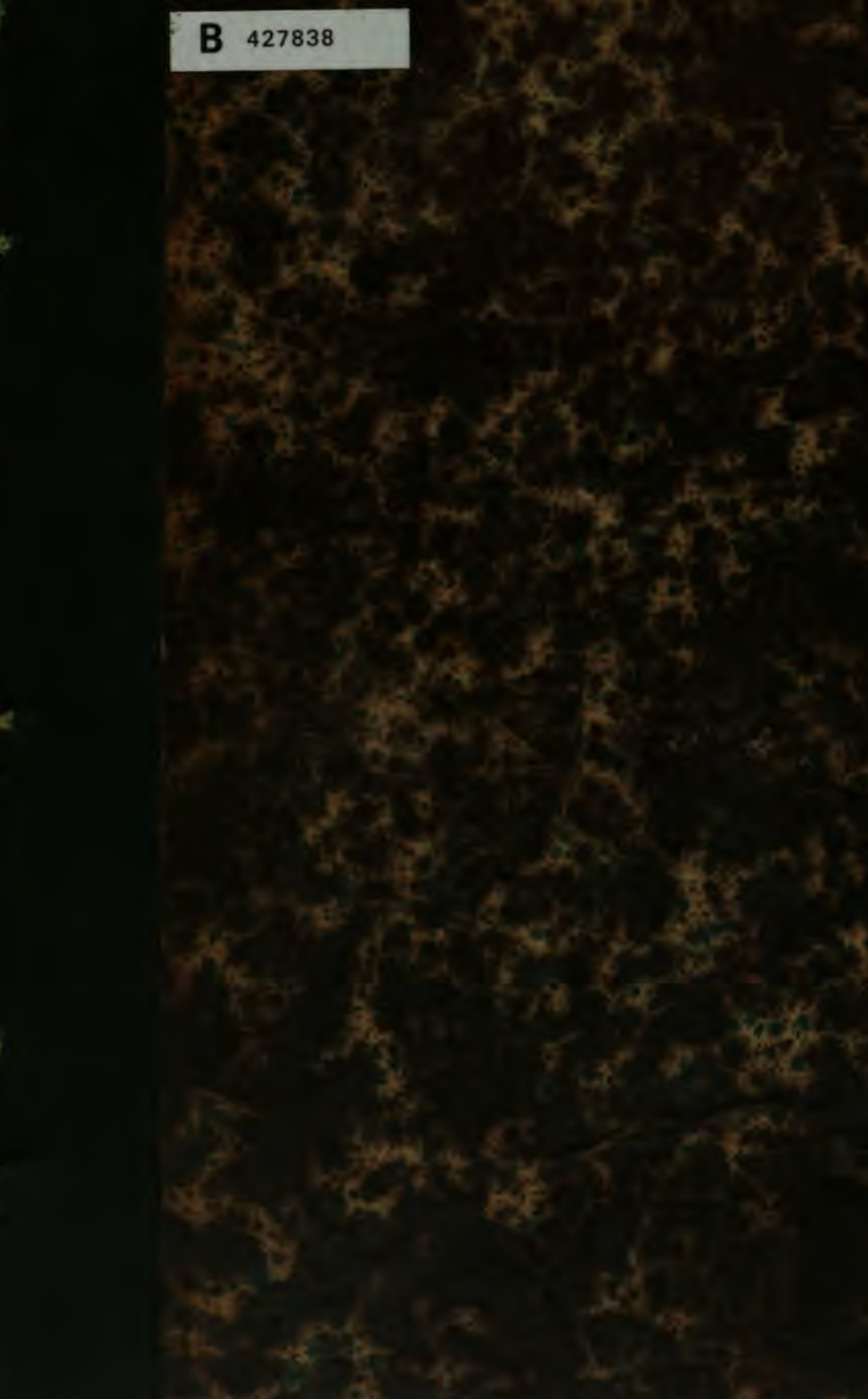
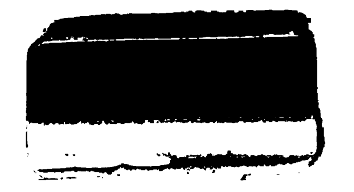

B 427838



MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES
AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

15e FASCICULE — TEXTE

Traité des Eaux. 1re Partie : Hydraulique

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1873

HYDRAULIQUE

PROGRAMME

1. Écoulement de l'eau par les orifices. — Mouvement d'un liquide homogène. — Effet des changements de section. — Écoulement par des orifices évasés. — Écoulement par des orifices en mince paroi ; contraction de la veine fluide.

Perte de force vive par l'effet d'un élargissement brusque de section. — Ajutages cylindriques et coniques.

Écoulement par des vannes et des déversoirs.

2. Mouvement de l'eau dans les tuyaux de conduite. — Relation entre la vitesse, le diamètre et la charge perdue par le frottement. — Détermination de la pression en un point quelconque de la conduite. — Calcul des éléments d'une distribution d'eau.

3. Mouvement de l'eau dans les canaux découverts. — Mouvement varié permanent sans changement brusque de section ; gonflement produit par un barrage dans un canal dont la pente et le profil transversal sont constants, gonflement produit par un pont.

4. Jaugeage des cours d'eau. — Divers procédés employés. — Usage des formules de l'hydraulique.

5. Notions sur la résistance de l'eau ou de l'air au mouvement des corps solides.

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

CHAPITRE II.

Écoulement de l'eau par des orifices à périmètre fermé.

CHAPITRE III.

Écoulement de l'eau par des orifices à périmètre non fermé. — Déversoirs. — Canaux.

CHAPITRE IV.

Pressions réciproques des solides et de l'eau en mouvement. Jaugeage des cours d'eau

TRAITÉ DES EAUX

PREMIÈRE PARTIE

HYDRAULIQUE

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES USAGES DE L'EAU

CLASSIFICATION

« J'ay voulu quelquefois, dit Bernard de Palissy, mettre par estat les arts qui cesseroient alors qu'il n'y auroit plus de bois ; mais, quand j'en eus écrit un plus grand nombre, je n'en sceus jamais trouver la fin à mon escript, et, ayant tout considéré, je trouvay qu'il n'y en avoit pas un seul qui se pût exercer sans bois. »

Ce que Bernard de Palissy disait du bois, à plus forte raison le dirons-nous de l'eau : elle est nécessaire non-seulement à tous les arts, mais à la vie même de l'homme et des animaux.

C'est à grands frais que nous allons la chercher au loin pour l'amener dans nos villes.

En dehors de l'alimentation, elle nous rend bien d'autres services : par sa fluidité, elle tend toujours à descendre vers les points les plus bas, et en tombant elle engendre un travail que nous recueillons pour faire mouvoir nos usines, et qui ne nous coûte rien. Dans les machines à vapeur, elle est l'intermédiaire qui transforme la chaleur en travail mécanique.

Répandue à la surface des terres, elle apporte à la végétation une humidité bienfaisante et donne la fertilité à un sol aride ; c'est l'irrigation qui produit ces résultats.

Les eaux qui s'évaporent des mers et de la surface entière du globe se réunissent dans l'atmosphère, s'y condensent et retombent sur la terre pour re-

tourner à leur point de départ, parcourant un cycle éternel; recueillies par les cimes et les versants, elles les rongent et les dégradent; elles travaillent sans relâche à niveler la surface de la terre. Le limon qu'elles entraînent avec elles se dépose lorsque la vitesse est naturellement ou artificiellement ralentie, il exhausse les marécages et les transforme en terrains fertiles, transformation qui porte le nom de colmatage.

Les rivières sont des chemins qui marchent; elles entraînent dans leur cours les corps flottants qu'on leur confie et transportent à peu de frais des masses énormes de matières encombrantes. L'eau est donc le plus économique des instruments de transport, et il n'est pas étonnant qu'après avoir usé des rivières naturelles l'homme ait créé les rivières artificielles, c'est-à-dire les canaux.

Dans ce qui précède, nous n'avons considéré l'eau que sous son côté utile; elle est bien souvent un précieux auxiliaire, mais bien souvent aussi elle se présente comme un ennemi terrible qu'il faut combattre. Il est des torrents et des fleuves qui rongent leurs rives et qui entraîneraient les champs voisins avec les habitations si on ne les contenait entre des digues élevées et résistantes. Il en est d'autres qui se gonflent sous l'influence des pluies et de la fonte des neiges, qui sortent de leur lit pour couvrir des vallées entières; il appartient à l'ingénieur de rechercher les moyens capables de prévenir ou d'amoindrir de pareils désastres.

Il lui appartient aussi d'assainir les marécages, de donner un écoulement aux eaux qui les recouvrent afin de rendre à la culture un sol improductif.

En certains points, l'eau ne recouvre point la surface de la terre, elle l'imbibe à l'intérieur, elle y séjourne et par l'excès d'humidité rend la culture improductive. Il faut donner un écoulement à cette eau dormante, sans cependant altérer le sol outre mesure; on y arrive au moyen de la canalisation souterraine qu'on appelle drainage.

Cet exposé sommaire nous enseigne que nous pouvons classer les eaux en eaux utiles et eaux nuisibles.

L'étude des eaux utiles comprendra :

Les moteurs hydrauliques, les machines à vapeur,
Les distributions d'eau et les égouts qui en sont le corollaire,
Les irrigations et colmatages,
Les rivières et canaux,
Les ports de mer,

ces deux dernières sections pouvant être réunies en une seule intitulée : « de l'eau comme moyen de transport. »

Les moteurs hydrauliques et les machines à vapeur ont été traités en détail dans d'autres sections de notre ouvrage; nous n'y reviendrons pas.

L'étude des eaux nuisibles comprendra :

L'endiguement des cours d'eau, des étangs et des mers,
Le curage des rivières,
Le desséchement des marais,
Le drainage.

De ces divers sujets, il en est qui se touchent par des points communs et qu'il convient d'examiner simultanément.

Mais, avant d'aborder l'étude pratique des eaux, il faut en connaître les pro-

priétés physiques et mécaniques; c'est la science appelée hydraulique qui les enseigne.

Notre traité des eaux se divisera donc comme il suit :

1re PARTIE — Hydraulique, ou étude théorique et expérimentale des propriétés physiques et mécaniques de l'eau.

2e PARTIE. — Distributions d'eau. — Égouts.

3e PARTIE. — Irrigations et colmatages. — Curage des cours d'eau. — Desséchement des marais. — Drainage.

4e PARTIE. — De l'eau comme moyen de transport. { Rivières et canaux. Ports de mer.

CHAPITRE PREMIER

HISTORIQUE. — PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES

HISTORIQUE

Quelques principes tirés de la philosophie naturelle et de l'observation des mouvements les plus simples ont suffi pour établir la mécanique rationnelle et pour permettre d'aborder, avec le puissant secours des mathématiques, les questions les plus ardues de cette partie de la science. Les machines élémentaires étaient connues et expliquées par les savants de l'antiquité.

Il n'en est point de même de l'hydraulique, qui s'occupe d'une masse fluide dont les parties élémentaires échappent à l'analyse. Elle n'a pu se développer que du jour où l'on a découvert par l'expérience une importante propriété des liquides.

C'est Archimède qui a posé les fondements de cette science, en établissant qu'un point d'une masse liquide était également pressé dans tous les sens.

L'École d'Alexandrie inventa des machines ingénieuses, des pompes, qui fonctionnaient par la gravité de l'eau combinée avec la pression de l'air; malheureusement l'explication des phénomènes ne fit aucun pas et l'on s'en tint pendant longtemps au fameux axiome : « la nature a horreur du vide. »

Dans l'antiquité, les machines élévatoires seules se développèrent; on connut la vis d'Archimède, le tympan, les chaînes à godets. On connut aussi les clepsydres, qui servaient à mesurer le temps par l'écoulement de l'eau. Ce n'est guère qu'à l'époque d'Auguste qu'on trouve mention des moulins à eau.

Frontin, qui fut inspecteur des eaux de Rome sous Nerva et Trajan, dans ses *Commentaires sur les conduites d'eau de la ville*, pose quelques règles pratiques; il signale particulièrement ce fait que le débit d'un ajutage dépend de la hauteur d'eau qui se trouve au-dessus de cet ajutage, mais il ne recherche point la relation qui existe entre le débit et la hauteur.

Pendant tout le moyen âge, la science demeura dans une nuit profonde; elle ne revit le jour qu'à la Renaissance et encore ne se réveilla-t-elle qu'après les lettres et les arts.

Galilée soupçonna la pesanteur de l'air que démontra son disciple Toricelli; le vieil adage fut détrôné et la pesanteur de l'air expliqua nettement le mouvement de l'eau dans les pompes.

Ayant remarqué qu'un jet d'eau s'élevait presque à la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir qui l'alimentait, Toricelli pensa que les lois de l'écoulement en mince paroi étaient identiques à celles de la chute des graves et que la

vitesse avec laquelle le liquide s'échappait était la même que si ce liquide fût tombé librement du haut du réservoir. Cette idée fut confirmée par les expériences des physiciens de l'époque.

En 1663 parut le *Traité de l'équilibre des liqueurs* où Pascal démontrait par l'expérience et le raisonnement les lois de l'hydrostatique. En 1686, le traité de l'abbé Mariotte apporta une nouvelle pierre à l'édifice.

En 1687, Newton, dans ses principes mathématiques, signala l'influence qu'exerce sur le débit la contraction de la veine liquide.

Daniel Bernoulli prit l'hydraulique en cet état, et fit paraître en 1738 son hydrodynamique, où l'on trouve le théorème qui porte son nom, que nous exposerons plus loin et qui sert encore de base à presque tous nos calculs pratiques; c'est une alliance de la physique et des mathématiques, alliance féconde en résultats.

En 1744, d'Alembert, appliquant son théorème des mouvements virtuels qui transforme toutes les questions de mouvement en questions d'équilibre, jeta une vive lumière sur toutes les branches de la mécanique et en particulier sur l'hydraulique; il résolut par sa méthode tous les problèmes anciens et donna la solution de quelques autres.

Il posa les équations fondamentales du mouvement des fluides; Euler et de La Grange étendirent encore le champ de ces investigations.

Malheureusement, ils épuisèrent toutes les ressources de l'analyse mathématique sans que leur belle théorie pût entrer dans le domaine de la pratique.

Elle est restée l'apanage de la science pure et nous ne pouvons l'aborder dans un ouvrage élémentaire.

Pour obtenir des résultats utiles et non plus simplement spéculatifs, il a fallu marcher le flambeau de l'expérience à la main. C'est ce qu'ont fait tous nos savants modernes, parmi lesquels nous citerons Bossut, Dubuat, d'Aubuisson, Prony, Eytelwein, Poncelet et Lesbros, Darcy, Dupuit, Bazin, etc.

Les méthodes que nous allons exposer sont donc plus empiriques que rationnelles. Néanmoins, elles sont importantes par l'utilité du sujet, et, si elles s'éloignent de la rigueur mathématique, si elles subordonnent le calcul à l'expérience, elles n'en donnent pas moins satisfaction aux besoins de la pratique.

HYDROSTATIQUE

De la fluidité. — Dans les corps solides, les molécules ont entre elles un mode d'agrégation tel qu'on ne peut les faire mouvoir les unes par rapport aux autres sans exercer un effort plus ou moins considérable, destiné à vaincre la cohésion et le frottement. Lors même que les molécules sont séparées et que l'on cherche à faire glisser l'un sur l'autre deux corps solides, il faut développer un effort continu pour commencer le mouvement et pour l'entretenir.

Dans les corps fluides, au contraire, les molécules n'ont entre elles aucune cohésion; elles sont susceptibles de se mouvoir les unes par rapport aux autres sans aucun frottement.

C'est cette absence absolue de frottement qui caractérise la fluidité. En fait, la fluidité n'est pas absolue, et les frottements interviennent dès qu'il s'agit de mouvements dont la vitesse est un peu considérable. Mais, lorsque la masse

liquide est en équilibre absolu ou relatif, ou lorsque les molécules ne sont animées que de mouvements très-lents, la fluidité parfaite est presque réalisée; en effet, les résultats qu'on déduit alors de l'hypothèse de la fluidité sont vérifiés par l'expérience.

On distingue deux classes de fluides :

1° Les liquides, ou fluides incompressibles. L'incompressibilité n'est pas non plus chose absolue; en réalité, elle n'existe pas. Seulement la compressibilité de l'eau est tellement faible qu'on ne commet point d'erreur sensible en la faisant nulle dans la pratique ;

2° Les gaz, ou fluides élastiques, qui remplissent toujours tout le vase où on les renferme et qui prennent un volume déterminé pour une pression et une température déterminées. Nous avons étudié les propriétés des gaz en physique et dans notre *Traité des machines à vapeur;* nous ne reviendrons pas sur ce sujet et nous ne nous occuperons ici que des liquides et spécialement de l'eau.

Théorème : *Une molécule d'une masse liquide en équilibre est également pressée dans tous les sens.* — En effet, à cause de la fluidité, cette molécule est libre de se mouvoir sans aucun frottement dans un sens quelconque; si, suivant une direction quelconque, elle était soumise à deux pressions inégales, elle obéirait à la plus forte et se déplacerait; puisqu'elle reste en équilibre, c'est que rien ne la sollicite à se mouvoir dans un sens plutôt que dans l'autre, elle est donc également pressée dans tous les sens.

On voit là toute la différence qui existe entre les solides et les liquides; lorsqu'une force presse un solide, elle tend à le mouvoir tout entier suivant sa direction; pour maintenir l'équilibre, il suffit d'opposer directement à la première force une force égale. Si l'on appliquait ces deux forces à une goutte liquide de même volume, cette goutte liquide s'aplatirait normalement aux forces et toutes les molécules se déroberaient latéralement.

Principe de Pascal : *Égalité de pression dans tous les sens.* — Considérons un liquide remplissant complétement un vase clos de forme quelconque, ce liquide exerce sur chaque élément plan de la paroi du vase une pression normale à cet élément; nous disons une pression normale, car, si elle était inclinée, elle aurait une composante parallèle à la paroi et, vu l'absence de frottement, la molécule liquide glisserait le long de la paroi et par suite ne serait plus en équilibre.

Pression en un point. — Si, autour d'un point donné A on prend une petite surface et qu'on divise la pression qui s'exerce sur cette surface par son aire, on aura la pression par unité de surface, c'est-à-dire par mètre carré. Supposez que l'on diminue la surface choisie jusqu'à ce qu'on la réduise à l'élément infiniment petit que représente le point A, et que l'on prenne toujours le rapport entre la surface et la pression, la limite de ce rapport représentera la pression au point A.

Revenons maintenant au principe de Pascal :

Nous avons un vase clos de forme quelconque, plein de liquide, et nous faisons abstraction pour le moment de l'action de la pesanteur; découpons sur la paroi un orifice que nous fermerons par un petit piston, l'équilibre se maintiendra pourvu que nous appliquions normalement à ce piston une pression égale à celle que subissait la portion de paroi. Faisons la même opération sur une surface égale de la paroi en un endroit quelconque, la force à appliquer sur le nouveau piston pour maintenir l'équilibre sera égale à la précédente.

Cela résulte immédiatement du théorème des travaux virtuels que nous avons exposé en mécanique rationnelle; il n'y a ni compressibilité, ni frottement d'aucune sorte; en désignent par F et F′ les pressions normales aux deux pistons, si l'on enfonce l'un d'une quantité ε, l'autre sortira de la même quantité puisque le liquide est incompressible; à cause de l'absence de tout frottement, les forces en présence se réduisent à F et F′; leurs travaux virtuels $F\varepsilon$ et $F'\varepsilon$ sont de signe contraire et doivent donner une somme algébrique nulle, d'où résulte $F = F'$.

Ainsi, abstraction faite de la pesanteur, deux éléments égaux sont soumis à des pressions égales, ce qui veut dire que la pression varie proportionnellement à l'étendue de la surface.

La vérification expérimentale de ce principe est bien facile, elle nous est fournie par la presse hydraulique.

La presse hydraulique se compose de deux corps de pompe verticaux reliés par un tube; dans chaque corps de pompe est un piston. Supposons l'un cent fois plus étendu que l'autre, si l'on exerce sur le petit piston un effort d'un kilogramme, il faudra exercer sur le grand pour le maintenir en équilibre et l'empêcher de se soulever un effort de 100 kilogrammes.

Pressions hydrostatiques dans un liquide pesant. — Les résultats précédents ne s'appliquent pas tous à un liquide pesant, c'est-à-dire placé dans les conditions ordinaires.

Une molécule liquide est toujours également pressée dans tous les sens; ce principe est une conséquence immédiate de la fluidité.

La surface du liquide est horizontale, car, supposez qu'elle soit inclinée en un endroit quelconque et considérez une molécule, son poids peut se décomposer en deux forces, l'une normale à la surface, détruite par l'incompressibilité, l'autre parallèle à la surface et qu'aucun frottement ne peut annuler. La molécule va donc glisser sur le plan incliné et descendre au point le plus bas. Cet effet se produira tant que tous les éléments de la surface ne seront pas dans un même plan horizontal.

La surface du liquide ne serait plus horizontale s'il était soumis à des forces extérieures autres que la pesanteur. Exemple : considérez, figure 1, un vase renfermant de l'eau, animé d'un mouvement uniforme de rotation autour de son axe, mouvement dont la vitesse angulaire est ω, la surface supérieure se creuse et prend la forme d'un paraboloïde de révolution. En effet, une molécule (m) ne peut être en équilibre qu'autant que la résultante des forces qui la pressent est normale à la surface du liquide; or les forces qui agissent sur cette molécule sont : son poids p, représenté par la droite (mp), la force centrifuge $(m\mathrm{F})$ égale à $\frac{mv^2}{r}$, expression dans laquelle (m) est la masse $\left(\frac{p}{g}\right)$ de la molécule, r le rayon (mb) de rotation, et v la vitesse de circulation qui n'est autre que le produit de la vitesse angulaire (ω) par le rayon (r); la force centrifuge peut donc s'écrire

Fig. 1.

$$\frac{p}{g}\frac{\omega^2 r^2}{r} = \frac{p\omega^2}{g}.r.$$

Les deux triangles (mab), (mpq) sont semblables et donnent :

$$\frac{ab}{mb}=\frac{mp}{pq} \quad \text{ou} \quad \frac{ab}{r}=\frac{p}{\left(\frac{p\omega^2 r}{g}\right)} \qquad ab=\frac{g}{\omega^2}.$$

Le mouvement étant uniforme, ω est constant, donc (ab) l'est aussi ; cette ligne est la sous-normale de la courbe considérée. La courbe dont la sous-normale est constante est une parabole. Par suite, la surface du liquide est coupée par un plan vertical quelconque suivant une parabole constante ; cette surface est un paraboloïde de révolution.

Lorsqu'une rivière rapide circule dans une courbe de faible rayon, certains observateurs ont cru remarquer que la surface de l'eau ne restait pas horizontale, mais qu'elle était plus élevée sur la rive de grand rayon que sur la rive de petit rayon ; cet effet est admissible, ainsi que nous venons de le voir par l'exemple précédent. La section de la surface par un plan vertical est alors une courbe logarithmique. En fait, ce résultat est bien difficile à observer, car on ne trouve jamais des rivières à cours rapide avec des courbes de petit rayon.

Égalité de pression dans un plan horizontal. — La pesanteur intervenant, la pression n'est plus la même sur deux surfaces égales placées d'une manière quelconque.

En appliquant le théorème des travaux virtuels, comme nous l'avons indiqué plus haut, il faudrait introduire dans l'équation le travail dû à la pesanteur, et l'équation ne se réduirait plus à $F=F'$.

Cette égalité ne se produirait que dans le cas où le travail de la pesanteur serait nul, c'est-à-dire pour des éléments situés sur un même plan horizontal.

Ainsi la pression est constante en tous les points d'une même tranche horizontale.

Déterminons la valeur de cette pression :

Soit, à cet effet, deux tranches horizontales voisines, ab, $a'b'$; par un élément (mn) de la première menons un cylindre vertical, il découpera sur la seconde tranche un élément égal au premier.

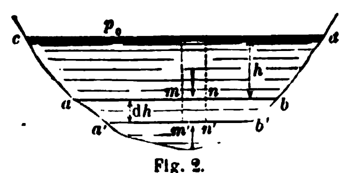


Fig. 2.

Le petit cylindre mn, $m'n'$ est soumis à l'action de trois forces verticales, savoir : la pression (p) sur (mn) ; la pression $(p+dp)$ sur $(m'n')$, la quantité dp est l'accroissement infiniment petit de la pression lorsqu'on passe d'une tranche à la tranche voisine, et son poids qui est égal au produit $\pi.s.dh$, dans lequel π est la densité du liquide, s l'aire de la surface mn, et (dh) l'accroissement infiniment petit de la hauteur.

L'équation de l'équilibre nous donne :

$$p+dp=p+\pi.s.dh \qquad \text{ou} \qquad dp=\pi s.dh$$

en intégrant cette équation et désignant par p_0 la valeur de la pression atmosphérique à la surface libre du liquide, on arrive à :

$$p=p_0+\pi.s.h.$$

Ainsi, l'accroissement de pression sur l'élément (mn), lorsque cet élément horizontal s'enfonce de la surface libre (cd) au plan (ab), est égal au poids de la colonne liquide qui surmonte l'élément (mn).

Ce résultat est facile à démontrer expérimentalement :

On a un tube en verre dont le fond est remplacé par un disque poli que l'on maintient au moyen d'une ficelle; on enfonce ce tube dans un vase plein d'eau la pression de l'eau applique le disque contre le tube; on remplit peu à peu ce dernier avec de l'eau, et le disque ne se détache que lorsque le niveau à l'intérieur est le même que dans le vase. La pression sur le fond est donc bien représentée par la colonne d'eau comprise entre ce fond et la surface.

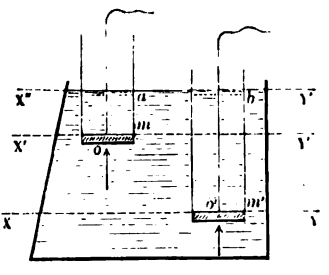


Fig. 3.

Hauteur représentative d'une pression. — La pression p en un point est, avons-nous dit, rapportée à l'unité de surface; la colonne d'eau verticale, dont le poids est égal à cette pression, ayant pour base l'unité de surface, pour hauteur h et pour densité π a pour poids πh.

D'où la relation

$$p=\pi h, \quad \text{ou}, \quad \frac{p}{\pi}=h.$$

La quantité π est constante, vu l'homogénéité et l'incompressibilité du liquide; la pression p peut donc être représentée tout simplement par la hauteur h.

C'est ce qu'on fait dans la pratique. On désigne les pressions par les hauteurs de liquide qui les représentent.

Paradoxe hydrostatique. — De ce qui précède résulte que la pression sur le fond d'un vase est absolument indépendante de la forme de ce vase et ne dépend que de la hauteur d'eau qu'il contient. Ainsi, imaginez un vase à large panse se prolongeant par un col effilé de grande hauteur, la pression sur le fond pourra atteindre une valeur très-considérable, bien que le poids transmis au support soit relativement très-faible. Ce phénomène, curieux au premier abord, porte le nom de paradoxe hydrostatique.

Liquides superposés. — La surface de séparation de plusieurs liquides superposés de densité différente est toujours horizontale.

En effet, la pression est uniforme dans une section horizontale pour les raisons précédemment développées et elle est mesurée en chaque point par la hauteur de liquide superposé; il faut donc que toutes les colonnes liquides élémentaires aient exactement la même composition afin de posséder le même poids; par suite, les hauteurs des différents liquides sont les mêmes dans chaque colonne et leurs surfaces de séparation sont horizontales.

Les liquides se superposent par ordre de densité, le plus lourd au fond. En effet, une masse liquide ne peut être en équilibre instable; lorsqu'elle est en équilibre, c'est un équilibre stable. Or l'équilibre stable d'un corps pesant ne se réalise que lorsque le centre de gravité occupe la position la plus basse qui lui soit permise. eu égard aux liaisons dont il est affecté. Donc, les molécules liquides se disposeront dans le vase qui les contient de telle sorte que le centre de gravité de l'ensemble se trouve le plus bas possible, chose qui ne se réalisera qu'autant que les liquides seront superposés dans l'ordre de leurs densités.

Vases communiquants. — Lorsque plusieurs vases de forme quelconque sont implantés sur un même tuyau, le liquide s'élève dans tous ces vases à la même hauteur. En effet, la pression doit être constante en tous les points d'une

tranche horizontale du tuyau commun, ce qui n'arrivera que si la hauteur de l'eau dans les différents vases est partout la même.

Ce phénomène est, du reste, bien facile à vérifier par l'expérience.

Si l'on a deux vases communiquants renfermant deux liquides de densité différente, la hauteur respective de ces deux liquides au-dessus de la tranche horizontale qui les sépare est en raison inverse de la densité.

Cela découle encore du principe de l'égalité des pressions dans un plan horizontal.

Pression totale d'un liquide homogène sur une surface plane. — Soit un vase ($abkl$) dans lequel il y a de l'eau jusqu'au niveau (ab). On demande de calculer la pression totale que le liquide exerce sur la portion de paroi projetée sur la ligne (cd).

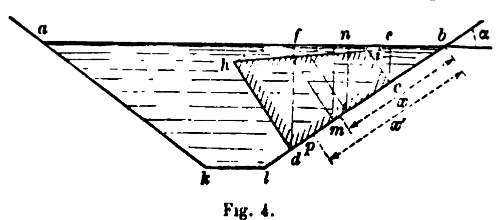


Fig. 4.

En chaque élément (m), de superficie ω, de cette portion de paroi, s'exerce une pression normale représentée par la hauteur (mn) ou h; la valeur de cette pression en kilogrammes, si l'on appelle π la densité du liquide, est donc ($\pi\omega h$).

Il faudrait ajouter à cette pression la pression atmosphérique qui règne au-dessus de (ab); généralement, la pression atmosphérique s'exerce aussi sur la face non mouillée de la paroi, il n'y a donc pas lieu d'en tenir compte. Au cas où la pression qu'on rencontre à la surface du liquide ne serait pas la même que celle qui s'exerce au dehors de la paroi, il serait bien facile de tenir compte de la différence constante.

Ainsi, en chaque élément de la surface (dc) on trouve une pression normale à cette surface égale à $\pi\omega h$.

La pression totale est la résultante de toutes ces forces parallèles, elle est égale à leur somme.

$$\Sigma\,(\pi\omega.h) \quad \text{ou} \quad \pi.\Sigma.(\omega h)$$

Si l'on désigne par Ω la surface totale et par H la profondeur du centre de gravité de la surface (cd) au-dessous du niveau de l'eau, si l'on se rappelle en outre que, par définition même, la somme des moments de tous les points de la surface par rapport au plan ab est égale au moment, par rapport à ce même plan, de la surface entière supposée condensée en son centre de gravité, on écrira :

$$\Sigma(\omega.h) = \Omega.\mathrm{H}$$

et la pression totale sur la surface (cd) est $\pi.\Omega.\mathrm{H}$.

La voilà mise sous une forme simple : elle est le produit de la surface pressée par la densité du liquide et par la profondeur du centre de gravité de cette surface au-dessous du niveau de l'eau.

Son point d'application est le centre des forces parallèles appliquées aux divers éléments de la surface cd.

Imaginons un axe horizontal mené par le point b, où la surface libre du liquide coupe la paroi prolongée, et prenons par rapport à cet axe horizontal les moments de toutes les pressions élémentaires s'exerçant sur la surface considérée (cd); la pression en (m) est $\pi\omega h$, et son moment est $\pi\omega\, h.x$; la

somme de tous ces moments élémentaires est égale au moment de la résultante. Soit p le point d'application inconnu de cette résultante et x' son bras de levier par rapport à l'axe b. Nous aurons l'équation :

$$\pi\Sigma(\omega.h.x)=\pi.x'\Sigma(\omega h).$$

En chaque point (m), si l'on désigne par α l'angle de la paroi avec l'horizon, le triangle rectangle (mnb) donne :

$$h=x\sin\alpha,$$

et l'équation précédente devient :

$$\Sigma(\omega x^2)=x'\Sigma(\omega h)$$

qui fournit la valeur de x'.

Le calcul de l'ordonnée x' du centre de pression est analogue au calcul des centres de percussion dont on s'occupe en mécanique.

Ce calcul ne peut être mis en formule exacte lorsqu'il s'agit d'une surface non définie géométriquement; même avec des surfaces définies, l'intégration de la quantité (ωx^2) peut être fort difficile.

Il n'y a que dans les cas simples qu'on peut la calculer.

Ce qu'on peut dire du centre de pression de la surface cd, c'est qu'il est au-dessous de son centre de gravité : en effet, faisons tourner cette surface autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité de manière à la rendre elle-même horizontale, la pression sera uniforme, et le centre de pression se confondra avec le centre de gravité; mais dès qu'on inclinera, tant soit peu, la surface, l'uniformité des pressions disparaîtra, elles augmenteront au-dessous de l'axe de rotation et diminueront au-dessus, leur résultante totale se trouvera donc au-dessous de l'axe de rotation c'est-à-dire du centre de gravité, et l'écart des deux centres atteindra son maximum lorsque la surface (cd) sera devenue verticale.

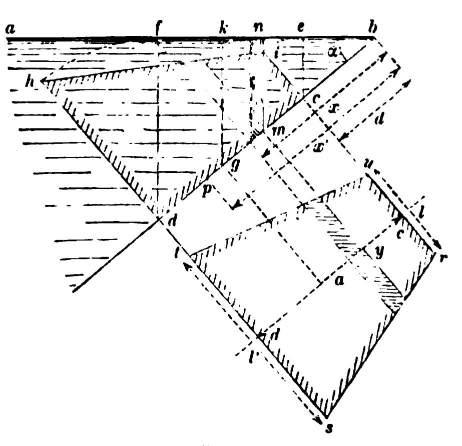


Fig. 5.

Faisons le calcul des pressions dans le cas où la surface cd est un trapèze à bases horizontales, ce qui comprend tous les cas de la pratique et toutes les formes de vannes qui peuvent se présenter.

La surface (cd) rabattue autour de la droite du même nom sera le trapèze $rstu$, ayant pour bases l et l' et pour hauteur (cd) ou (a); désignons par (d) la distance de l'horizontale supérieure c de la paroi au point b.

La surface Ω du trapèze est égale à $a.\dfrac{l+l'}{2}$; cherchons-en le centre de gravité il se trouve sur l'horizontale g qui divise la hauteur dc du trapèze en deux parties telles que :

$$\frac{gc}{dg}=\frac{2l'+l}{l'+2l} \quad \text{ou bien} \quad \frac{gc}{a}=\frac{2l'+l}{3(l'+l)}.$$

La longueur (bg) est donc égale à :

$$bc+cg=d+a.\frac{2l'+l}{3(l'+l)}$$

et la hauteur H est égale à cette quantité multipliée par $\sin\alpha$.

Il en résulte pour la pression totale la valeur :

$$(1) \qquad \pi.a.\frac{l+l'}{2}\left(d+a\frac{2l'+l}{3(l'+l)}\right)\sin\alpha.$$

Cherchons maintenant le centre des pressions :

Considérons la zone horizontale infiniment petite qui comprend le point m ; sa surface (ω) est mesurée par le produit de la hauteur (dx) et de la base y ; cette base, facile à calculer par les triangles semblables, a pour valeur :

$$l+(l'-l)\frac{x-d}{a}$$

La surface de la zone est donc :

$$\left[l+(l'-l)\frac{x-d}{a}\right]dx.$$

et la pression qu'elle supporte est le produit de cette surface par π, la densité, et par la hauteur mn ou $x\sin\alpha$; le moment de cette pression par rapport à l'axe horizontal passant au point b sera donc, en multipliant par le bras de levier x :

$$\pi.\sin\alpha\left[l+(l'-l)\frac{x-d}{a}\right]x^2dx.$$

On aura la somme des moments élémentaires en intégrant cette quantité de $x=d$ à $x=d+a$.

Quant au moment total, il est le produit de l'ordonnée x' du centre des pressions par la somme des pressions élémentaires; d'où l'équation :

$$x'.\int\pi\sin\alpha\left[l+(l'-l)\frac{x-d}{a}\right]x.dx=\int\pi\sin\alpha\left[l+(l'-l)\frac{x-d}{a}\right]x^2.dx.$$

$$x'=\frac{\int\left[l+(l'-l)\frac{x-d}{a}\right]x^2.dx}{\int\left[l+(l'-l)\frac{x-d}{a}\right]xdx}$$

Les intégrales sont prises de (d) à $(a+d)$.

Effectuant ce calcul, nous trouvons que la position du centre des pressions est déterminée par l'équation :

$$(2) \qquad x'=\frac{1}{2}\frac{a^2(l+3l')+2ad(4l'+2l)+6d^2(l+l')}{a(l+2l')+3d(l+l')}$$

Cette formule sera bien rarement utile ; cependant il peut arriver qu'on ait à en faire usage ; c'est pourquoi nous l'avons établie.

Elle permettra, du reste, de trouver les formules applicables dans les divers cas de la pratique. Voici les principales :

1° *Trapèze à fleur d'eau.* — Lorsque la paroi pressée est un trapèze dont la base supérieure est à fleur d'eau, il suffit de faire $d=0$ dans les formules (1) et (2) et l'on trouve :
pour la pression totale la valeur :

$$\frac{1}{6}\pi a^2(2l'+l)\sin\alpha$$

et pour la position du centre des pressions

$$x'=\frac{1}{2}\frac{a^2(l+3l')}{a(l+2l')}$$

2° *Triangle dont le sommet est à fleur d'eau.* — Dans ce cas, il faut annuler à la fois (d) et (l) et l'on trouve :

pour la pression totale, la valeur. . . . . $\frac{1}{3}\pi a^2 l' \sin\alpha$

et pour la position du centre des pressions. . . . . $x'=\frac{3}{4}\cdot a$

3° *Rectangle dont la base supérieure est à fleur d'eau. — Vanne ordinaire.* — C'est le cas qu'on rencontre le plus fréquemment; généralement c'est celui que toutes les vannes présentent. Il faut faire $d=0$ et $l=l'$ et l'on trouve :

pour la pression totale la valeur. . . . . $\frac{1}{2}\pi a^2 l \sin\alpha$

et pour la position du centre des pressions. . . . . $x'=\frac{2}{3}a$

Presque toujours, la vanne est verticale et il faut faire alors $\sin\alpha=1$. Exemple, figure 6 :

Soit une vanne verticale de 2 mètres de haut et de 0^m,40 de large; la pression qu'elle supporte est représentée par le triangle bdf dont la base est égale à la hauteur; en adoptant pour la densité π le nombre 1000, puisque le mètre cube d'eau pèse 1000 kilogrammes, la pression totale sera de :

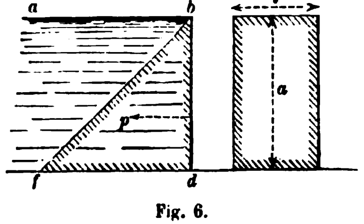


Fig. 6.

$$\frac{1}{2}.1000.4.0,40=800 \text{ kilogrammes.}$$

et le centre des pressions sera en p, aux deux tiers de la hauteur, c'est-à-dire à 1^m,33 au-dessous du niveau de l'eau.

Si donc on voulait maintenir la vanne par une poussée exercée derrière elle, cette poussée devrait être de 800 kilogrammes, et il faudrait en outre appliquer cette poussée aux deux tiers de la hauteur à partir de la surface de l'eau et non pas à *la moitié*, comme on en aurait envie au premier abord.

Pression sur une surface courbe. — La pression sur un élément de surface est toujours normale à cet élément; lorsqu'il s'agit de rechercher la pression totale sur une surface plane, le problème est simple puisqu'il ne s'agit que de composer des forces parallèles. Mais, s'il s'agit d'une surface courbe, le pro-

blème se complique, les forces élémentaires se trouvent dans des plans différents et il est bien rare qu'elles possèdent une résultante unique.

Cependant on peut trouver une résultante unique dans le cas où la surface pressée est une surface de révolution.

Résistance d'un tuyau cylindrique. — Soit, par exemple, un tuyau cylindrique rempli d'eau dont la pression est (p) par mètre carré, figure 7.

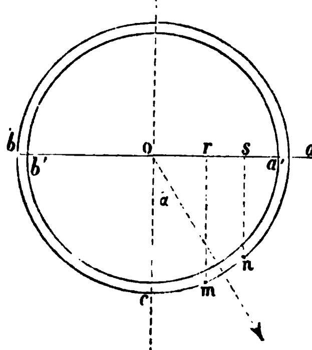


Fig. 7.

Considérons la demi-section transversale (abc) de cette conduite, dont l'épaisseur est représentée par aa'. La résultante de toutes les pressions élémentaires est évidemment dirigée suivant le rayon qui passe au sommet (c) du demi-cylindre; cherchons la valeur de cette résultante sur un mètre de longueur du cylindre.

Sur l'élément (mn), la pression par mètre courant est ($p.mn$) et donne sur l'axe (oc) une composante égale à ($p.mn.\cos\alpha$). Mais la quantité ($mn.\cos\alpha$) est la projection (rs) de l'élément sur le plan diamétral.

Donc, la résultante totale des pressions sur un mètre courant du demi-cylindre est égale au produit de la pression p par la surface du plan diamétral (ab), soit ($p.d$), d étant le diamètre de la conduite. Pour avoir la pression effective, il faudrait retrancher la pression extérieure due à l'atmosphère; mais, comme généralement, le liquide intérieur lui-même est en communication avec l'atmosphère, puisqu'il vient d'un réservoir, il suffit de prendre pour la valeur de p celle que représente la différence de niveau entre le réservoir et la partie considérée du tuyau de conduite.

Sous l'influence de la pression précédente, le tuyau tend à se séparer en deux parties égales en se déchirant suivant aa' et bb'; si l'on appelle (e) l'épaisseur du tuyau, la surface résistante pour un mètre de longueur est représentée par ($2e$). Supposons qu'on ne veuille pas imposer à la matière dont est formée le tuyau un effort supérieur à R kilogrammes, par unité de surface, la pression totale ne devra pas dépasser ($2Re$) et, à la limite, on aura l'équation :

$$pd = 2Re$$

qui permettra, tout le reste étant connu, de déterminer l'épaisseur à donner au tuyau.

Exemple : un tuyau est soumis à une pression effective de 10 atmosphères, ce qui fait 103,300 kilogrammes par mètre carré de surface plane; ce tuyau a $0^m,20$ de diamètre; il est en fonte, et l'on ne veut pas que cette fonte travaille à l'extension à plus de 1 kilogramme par millimètre carré, ou de 1,000,000 kilogrammes par mètre carré; on aura pour en déterminer l'épaisseur l'équation :

$$103\,300.\ 0,20 = 2.\ 1000\,000.\ e.$$

d'où :

$$e = 0^m,010\,33.$$

on donnera à ce tuyau en fonte 11 millimètres d'épaisseur.

Résistance d'une sphère. — Le même calcul s'appliquera à la résistance d'une sphère.

La pression totale sur une moitié de cette sphère est égale au produit de la pression (p) par la surface d'un grand cercle $\frac{\pi d^2}{4}$.

La surface qui s'oppose à la séparation des deux hémisphères est $\pi.d.e$; R étant le coefficient de résistance adopté, cette surface peut être soumise à une pression ($\pi.R.d.e$). D'où résulte l'équation limite :

$$p.\pi.\frac{d^2}{4}=\pi.R.d.e \quad \text{ou} \quad pd=4Re$$

L'épaisseur à adopter sera la moitié de ce qu'elle serait pour un cylindre de même diamètre placé dans les mêmes conditions.

Principe d'Archimède. — Tout corps plongé dans un liquide est soumis, de la part des molécules qui l'entourent, à des pressions dont la résultante totale est égale et directement opposée au poids du liquide déplacé par le corps.

Ainsi, tout corps flottant ou immergé reçoit une poussée égale au poids du liquide qu'il déplace.

La démonstration de ce principe se trouve dans la notion même de la fluidité.

Considérons un liquide en équilibre et isolons par la pensée une masse de ce liquide; rien ne nous empêche de considérer cette masse comme solidifiée. Elle est soumise à deux sortes d'actions : 1° son propre poids, dû à une force extérieure, la pesanteur; 2° et les réactions des molécules qui l'entourent. La résultante totale de ces réactions doit, puisque l'équilibre existe, être égale et directement opposée à l'action de la pesanteur, c'est-à-dire au poids; donc, la masse considérée reçoit des molécules qui la touchent une poussée égale au poids du liquide qu'elle déplace.

Nous ne reviendrons pas sur les démonstrations expérimentales du principe d'Archimède que nous avons données en physique.

Corps flottants; métacentre. — C'est le principe d'Archimède qui régit les corps flottants : le poids du volume d'eau déplacé est égal au poids total du corps flottant.

Le poids du corps flottant est appliqué à son centre de gravité; la poussée du liquide est appliquée au centre de gravité de la partie immergée, et, dans les navires, ce dernier centre de gravité porte le nom de centre de carène.

Il y a équilibre lorsque le poids et la poussée, forces toutes deux verticales, sont dans le prolongement l'une de l'autre; le centre de gravité et le centre de carène se trouvent alors sur la même verticale.

L'état d'équilibre est stable ou instable.

Il est évidemment stable lorsque le centre de gravité est au-dessous du centre de carène, car alors le navire, écarté de sa position normale, est soumis à l'action d'un couple qui l'y ramène.

Mais, la position du centre de gravité au-dessous du centre de carène est bien rarement réalisée, et néanmoins l'équilibre peut s'établir.

Soit un navire, figure 8, dont (ab) est la ligne de flottaison; le centre de gravité du navire est en G au-dessus du centre de carène (c). On fait osciller le navire, la ligne de flottaison horizontale devient ($a'b'$) telle que le volume immergé (bob') reste égal au volume émergeant (aoa'); le volume déplacé est constant. Dans la nouvelle position, le centre de gravité G du navire ne bouge pas; le centre de carène, au contraire, se déplace et vient de (c) en (c'). Le corps flottant se trouve donc soumis à l'action d'un couple, dont une force P est appliquée

en G, tandis que l'autre, la poussée π est appliquée en (c'). Ce couple a pour bras de levier Gd. On appelle métacentre le point (m) où la nouvelle poussée π rencontre la verticale du centre de gravité, lorsqu'on fait osciller le navire d'une quantité infiniment petite par rapport à sa position primitive.

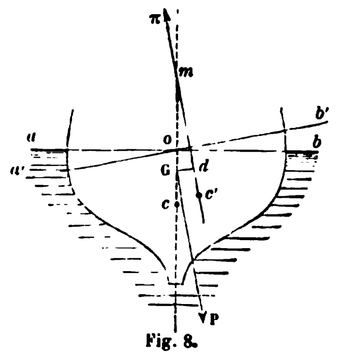


Fig. 8.

Le couple (π,P) tendra à ramener le navire à sa position normale lorsque le métacentre se trouvera au-dessus du centre de gravité.

Sinon, le navire chavirera.

Pour maintenir le métacentre dans une position convenable, et pour empêcher le renversement des navires dont la cargaison est déchargée, il faut les alourdir par une quantité suffisante de lest.

La théorie complète du métacentre est des plus ardues; il nous suffira de l'avoir indiquée.

HYDRODYNAMIQUE

Les équations générales du mouvement des fluides, posées par d'Alembert et mises sous la forme différentielle par Euler, n'ont pas été intégrées jusqu'à présent et, malgré l'intérêt qu'elles présentent, ne sont d'aucune utilité dans la pratique.

Les problèmes relatifs au mouvement des eaux se résolvent actuellement en prenant pour bases :

Le théorème des quantités de mouvement et le théorème des forces vives, dont on se sert d'ordinaire sous la formule que lui a donnée Daniel Bernoulli, formule qui, empruntant le nom de ce célèbre géomètre, s'appelle le théorème de Bernoulli.

Théorème des quantités de mouvement. — Nous avons défini *quantité de mouvement* d'un point matériel à un instant donné le produit de sa masse par sa vitesse; la quantité de mouvement d'un corps sera la somme des produits analogues ou ($\Sigma.m.v.$).

Nous avons défini impulsion d'une force le produit du nombre, qui mesure cette force, par le temps de son action; l'impulsion élémentaire est (F.dt) et l'impulsion pendant l'intervalle (t) est (F.t.).

Lorsqu'une force, variable ou constante, agit sur un point matériel, l'impulsion totale de cette force, pendant un certain temps, est égale à l'accroissement algébrique de la quantité de mouvement pendant le même temps, ce qui se résume par l'équation

$$\int_{t_0}^{t_1} F.dt = mv - mv_0$$

Pour un assemblage de points matériels, cette équation conduit au résultat suivant que nous avons démontré à la page 158 de notre *Traité de mécanique rationnelle :*

1° L'accroissement algébrique de la somme des quantités de mouvement de tous les points matériels d'un système, projetées sur un axe, est égal à la somme algébrique des impulsions totales de toutes les forces agissant sur le système, projetées sur le même axe;

2° Dans un système matériel, l'accroissement algébrique de la somme des moments des quantités de mouvement, par rapport à un axe quelconque, est égale à la somme des moments, par rapport au même axe, des impulsions de toutes les forces qui agissent sur le système

Nous aurons lieu de recourir, dans plusieurs questions, à ces théorèmes relatifs aux quantités de mouvement.

Théorème des forces vives. — On appelle force vive d'un point matériel le produit de sa masse par le carré de sa vitesse.

La force vive d'un système est la somme des forces vives de tous les points matériels qui composent ce système.

Le travail des forces est lié à la force vive par la relation suivante, que nous avons démontrée en mécanique rationnelle :

La somme des travaux des forces, tant intérieures qu'extérieures, d'un système est égale à la demi-variation de la force vive du système.

Ce qui s'exprime algébriquement par la formule :

$$\Sigma \text{ travail } (F+f) = \frac{1}{2} \Sigma (mv^2 - mv_0^2).$$

Les forces intérieures apparaissent dans ce théorème et cela se conçoit, car elles correspondent à des déplacements et à des déformations intérieures qui absorbent une certaine quantité de travail.

Ces forces intérieures ne disparaissent que dans trois cas :

1° Lorsqu'il s'agit d'un solide invariable;

2° Lorsqu'il s'agit d'un corps parfaitement élastique;

3° Lorsqu'il s'agit d'un corps parfaitement fluide : alors les molécules du corps se déplacent les unes par rapport aux autres sans frottement ni compression, comme si elles étaient libres; il n'y a point de forces intérieures; f est constamment nulle et ne saurait par conséquent produire aucun travail.

Le théorème des forces vives a donné naissance au théorème de Bernoulli.

THÉORÈME DE BERNOULLI

Régime permanent. — Lorsqu'une masse liquide est en mouvement et qu'en chaque point de cette masse les circonstances physiques restent constantes, il s'établit un régime permanent.

Le régime est la manière d'être de la masse liquide, et la permanence signifie que, toutes les circonstances restant les mêmes, la vitesse des molécules qui passent successivement en un point donné reste elle-même constante en grandeur et en direction. Donc, toutes les molécules qui passent successivement en ce point suivent exactement la même trajectoire avant comme après le passage.

L'homogénéité de la masse liquide est une preuve suffisante de la permanence du régime, permanence qu'il est du reste facile de vérifier par l'expérience, au moyen de flotteurs multipliés.

Ainsi, considérons une rivière ; à un jour donné, elle possède un régime permanent, parce que les conditions météorologiques n'éprouvent pas de variation; que ces conditions changent, le régime changera avec elles et ne tardera pas à retrouver un nouvel état de permanence en rapport avec les conditions nouvelles, et qui persistera autant qu'elles.

Conséquence du régime permanent. — La permanence du régime est facile à traduire en une équation algébrique :

Considérons une molécule m, elle suit une trajectoire (mn) ; menons à cette trajectoire deux plans A et B qui lui soient normaux ; prenons dans le premier plan A autour du point (m) une surface infiniment petite (mp); l'ensemble des molécules qui traversent cette surface constitue un filet liquide, c'est-à-dire une réunion de molécules dont toutes les vitesses sont égales et parallèles dans une même section transversale mp.

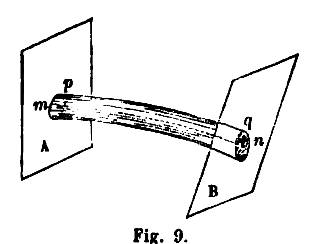


Fig. 9.

En vertu de la permanence, ce filet liquide conserve une figure constante, et sa section par un plan B, normal à la trajectoire (mn), est toujours la même.

Cette section (nq) n'a pas nécessairement la même étendue que la section primitive (mp), car les molécules peuvent changer de vitesse dans l'intervalle; le filet se gonfle et s'amincit suivant que sa vitesse croît ou diminue; toutefois, si l'on veut que les frottements des molécules liquides entre elles n'absorbent pas une notable quantité de force vive, il faut que les variations de la section du filet liquide ne soient ni brusques ni considérables.

Si l'on appelle (s) la surface du filet liquide en (m) et v sa vitesse, son débit Q à la seconde, c'est-à-dire le volume qui passera en m pendant l'unité de temps, sera

$$Q = v.s;$$

mais, à cause de l'incompressibilité du liquide, le volume qui passe en (m) est égal à celui qui passe en (n) dans le même temps ; ce dernier est égal à $(v's')$, et l'on a

$$(1) \qquad Q = v.s = v's' = \ldots$$

Démonstration du théorème de Bernoulli. — Cela posé, nous pouvons aborder la démonstration du théorème de Bernoulli.

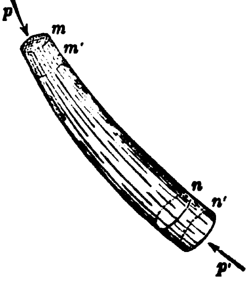


Fig. 10.

Soit un filet liquide (mn); nous admettons que les frottements latéraux, ainsi que les frottements intérieurs, sont négligeables, ce qui n'est vrai dans la pratique que si le filet liquide est de faible longueur, et si ses changements de section sont insensibles.

Les forces auxquelles est soumis le filet liquide se réduisent donc à la pesanteur, à la pression p qui s'exerce normalement à la section (m), et à la pression (p') qui s'exerce normalement à la section (n).

Appliquons le théorème des forces vives : le travail des forces qui sollicitent le filet liquide est égal à la demi-variation de la force vive.

Si l'on considère le mouvement pendant un temps très-court dt, la section (m)

vient en (m'), et la section (n) en (n'). La force vive initiale est celle de la masse (mn), et la force vive finale celle de la masse $(m'n')$; ces deux masses ont une partie commune $(m'n)$, et, en vertu de la permanence du mouvement, chaque molécule de cette partie commune a la même vitesse au commencement et à la fin de l'intervalle considéré, et par suite sa force vive ne varie pas. Il suffira donc de prendre la demi-différence de la force vive de la masse (nn') et de la force vive de la masse (mm').

Nous avons admis qu'il n'y avait aucune variation brusque de vitesse dans le filet liquide; donc, la vitesse en (n') est la même que la vitesse dans la section (n) infiniment voisine, et de même la vitesse en (m') est la même qu'en (m).

Désignons par π la densité du liquide, $\frac{\pi}{g}$ sera la masse de l'unité de volume, et

$$\frac{\pi}{g}.v.s.dt \quad \text{ou} \quad \frac{\pi}{g}.Q.dt$$

la masse du volume mm'; de même

$$\frac{\pi}{g}.v'.s'.dt \quad \text{ou} \quad \frac{\pi}{g}.Q.dt$$

sera la masse du volume (nn'). Il en résulte pour la demi-variation de force vive la valeur

$$\frac{1}{2}.\frac{\pi}{g}.Qdt.(v'^2-v^2).$$

La pression p exerce sur la surface s une poussée ps; le déplacement de son point d'application pendant le temps dt est vdt; son travail est donc

$$p.s.v.dt \quad \text{ou} \quad p.Q.dt$$

et ce travail est positif.

La pression p' produit de même un travail

$$p's'v'.dt \quad \text{ou} \quad p'\,Q.dt$$

et ce travail est négatif.

Reste à évaluer le travail de la pesanteur; il est égal au produit du poids de mn par l'abaissement de son centre de gravité, lorsque ce poids passe en $m'n'$. Or, dans les deux volumes, il y a une partie commune $m'n$ dont le centre de gravité ne bouge pas; le travail de la pesanteur se réduit donc au transport du poids infiniment petit (mm') en (nn'). Si l'on représente par z et z' les hauteurs des points m et n, l'abaissement vertical du poids mm' passant en nn' sera de $(z-z')$, et le travail produit de ce fait par la pesanteur sera

$$\pi.Q.dt.(z-z')$$

Égalant la demi-variation de la force vive et la somme des travaux des forces, nous trouvons :

$$(2) \qquad \frac{1}{2}\frac{\pi}{g}.Q.dt(v'^2-v^2)=p.Q.dt-p'.Q.dt+\pi.Q.dt(z-z').$$

ou : $$(3) \qquad \frac{v'^2}{2g}-\frac{v^2}{2g}=\frac{p}{\pi}-\frac{p'}{\pi}+(z-z')$$

ou encore

$$\frac{v^2}{2g}+\frac{p}{\pi}+z=\frac{v'^2}{2g}+\frac{p'}{\pi}+z'=\text{constante}.$$

On sait que toute molécule pesante, tombant librement d'une hauteur h, acquiert une vitesse v telle que $v^2=2gh$; la quantité $\frac{v^2}{2g}$ représente donc une hauteur de chute, et il en est de même, ainsi que nous l'avons déjà dit, pour la quantité $\left(\frac{p}{\pi}\right)$ ou hauteur représentative de la pression.

D'où résulte l'énoncé suivant du théorème de Bernoulli :

Énoncé du théorème. — Étant donné un filet liquide rapporté à un plan horizontal de comparaison, si en chaque point de ce filet liquide on fait la somme de :

1° La hauteur au-dessus du plan de comparaison,
2° La hauteur due à la vitesse,
3° La hauteur due à la pression,

on trouve une somme constante.

Représentation graphique du théorème. Colonnes piézométriques. — La figure 11 est une représentation graphique du théorème.

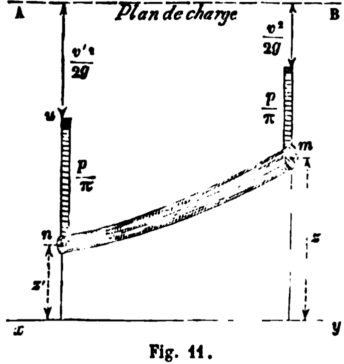


Fig. 11.

Supposez qu'en une section (n) du filet fluide on applique un tube ouvert en haut dans l'atmosphère, le liquide s'élèvera dans ce tube jusqu'à une hauteur telle qu'il produise à la base la pression (p'); cette hauteur sera donc égale à $\left(\frac{p'}{\pi}\right)$. C'est la hauteur représentative de la pression. On donne au tube (nu) le nom de tube piézométrique (qui mesure la pression), et la colonne d'eau (nu) est une colonne piézométrique.

Il faut remarquer que le tube piézométrique n'est pas une simple abstraction; on l'a réalisé fréquemment dans la pratique, et il a servi par exemple à mesurer les pressions en divers points d'une conduite d'eau. Nous le retrouverons plus tard.

Revenons à la figure 11 ; xy est le plan de comparaison, les quantités z et z' sont les hauteurs des points (m) et (n) au-dessus de ce plan, $\frac{p}{\pi}$ et $\frac{p'}{\pi}$ sont les colonnes piézométriques. Au-dessus de ces colonnes, si on porte les quantités $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$, $\left(\frac{v'^2}{2g}\right)$ qui représentent les vitesses, on arrivera à une hauteur constante au-dessus du plan de comparaison xy.

Plan de charge. — Les sommets de toutes les verticales obtenues en ajoutant en chaque point les trois quantités z, $\frac{p}{\pi}$ et $\frac{v^2}{2g}$ sont dans un même plan horizontal AB, car la somme de ces trois quantités est constante d'après le théorème de Bernoulli.

Le plan horizontal AB s'appelle le plan de charge.

Il est déterminé par le point de la masse liquide pour lequel la vitesse d'écoulement et la pression sont nulles ; si l'écoulement est alimenté par un réservoir à niveau constant, vitesse et pression sont nulles à la surface de ce réservoir, et c'est elle qui représente le plan de charge.

L'interprétation graphique du théorème de Bernoulli montre bien l'analogie que ce théorème présente avec le principe de la transformation réciproque du travail en force vive ; à toute production de travail correspond une perte de force vive ; à toute production de force vive correspond une perte de travail.

Dans l'écoulement des liquides, en dehors de l'accroissement de vitesse dû à la hauteur de chute, à tout accroissement de vitesse correspond une perte de pression, et réciproquement à toute diminution de vitesse correspond une augmentation de pression, de telle sorte que la somme des hauteurs représentatives de la vitesse et de la pression reste constante.

Le plan de charge est la limite au-dessus de laquelle le filet liquide ne peut s'élever. En effet, la somme $z+\frac{p}{\pi}+\frac{v^2}{2g}$ est une hauteur constante H, altitude du plan de charge par rapport au plan de comparaison ; le dernier terme de cette somme est toujours positif, puisque c'est un carré ; le second terme est toujours positif aussi, car il ne peut exister dans un liquide en équilibre des pressions négatives, c'est-à-dire des tensions, puisque les molécules, indépendantes les unes des autres, se sépareraient. Ainsi, le maximum de z se produira lorsque la pression et la vitesse seront nulles, et, à ce moment, l'altitude z du filet liquide sera précisément égale à l'altitude du plan de charge.

Transformation du théorème de Bernoulli lorsque les frottements interviennent. — En établissant plus haut l'équation du travail et des forces vives, nous avons supposé la fluidité parfaite, c'est-à-dire l'absence de tout frottement des molécules liquides soit entre elles, soit contre les parois qui les maintiennent.

Bien que cette supposition se trouve justifiée en diverses circonstances que nous examinerons plus loin, elle n'est pas vraie en général. Il existe toujours entre deux filets liquides voisins des frottements variables avec la vitesse ; l'influence des parois devient aussi très-sensible avec la vitesse, et, s'il s'agit par exemple d'un tuyau de grande longueur, des frottements élémentaires peu considérables absorbent en se multipliant une fraction notable de la force vive.

Ajoutez à cela les remous et tourbillons qui se produisent au passage des coudes et étranglements que présentent les vases où l'eau circule, et vous reconnaîtrez que les pertes de force vive atteignent souvent des valeurs considérables.

Alors le théorème de Bernoulli ne subsiste plus sous la forme simple que nous lui avons donnée plus haut, forme qui résulte de l'hypothèse d'une fluidité parfaite.

En effet, reportons-nous à l'équation (2), page 19, il faudra introduire dans le second membre de cette équation la somme des travaux des forces dues aux frottements de toute nature ; ces forces varient d'un point à l'autre du filet liquide, il est impossible théoriquement de les apprécier en bloc, et l'on aurait à faire la somme d'une infinité de travaux élémentaires.

Avec cette généralité, le théorème de Bernoulli n'est plus susceptible de rendre aucun service dans les calculs pratiques.

Cas où le théorème simplifié est applicable. — En résumé, que nous donne

le théorème de Bernoulli? La constante étant déterminée, il nous reste une relation entre la vitesse et la pression en un point déterminé.

Quelle est la relation de dépendance entre la vitesse et la pression en un point? Voilà ce qu'il faudrait savoir; car, connaissant alors par exemple la pression, le théorème de Bernoulli fournirait la valeur de la vitesse; multipliant cette vitesse par la section du filet liquide correspondant, on obtiendra t le débit, c'est-à-dire le volume du liquide qui traverse une section de la veine ou du filet pendant l'unité de temps.

Malheureusement, la relation entre la vitesse et la pression en chaque point d'une veine liquide n'est pas connue d'une manière générale, et on ne saisit pas bien comment elle pourrait être déterminée, même en négligeant les frottements.

Ainsi, le théorème de Bernouilli ne nous fournit qu'une équation entre deux inconnues, et, en général, ne permet point de résoudre les problèmes du mouvement des eaux.

Cependant, il est certains cas où l'on admet que les forces produites par les frottements n'ont qu'une minime importance, et peuvent être négligées en présence des forces extérieures, et il est possible alors de savoir comment les pressions varient avec les altitudes. Ces cas sont résumés dans les trois règles suivantes :

Première règle. — Lorsque chaque molécule d'un fluide parfait est animée d'une vitesse rectiligne et uniforme, les pressions varient suivant la loi hydrostatique, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent que de la profondeur de la molécule considérée au-dessous du niveau du liquide.

En effet, puisque le mouvement est rectiligne et uniforme, c'est qu'il n'est entravé par aucune force d'inertie ; toutes les actions auxquelles le fluide est soumis se font équilibre. Le fluide est dans les mêmes conditions que s'il se trouvait en repos, et les pressions en chaque point varient suivant la loi hydrostatique.

Cette conclusion admet que la viscosité est réellement négligeable, ce qui ne serait vrai que si tous les filets avaient même vitesse uniforme ; dans le cas contraire, les filets exercent les uns sur les autres un frottement réel ; elle suppose en outre que l'on ne considère qu'une assez faible longueur du courant liquide, parce que, sur une grande longueur, comme les frottements sont proportionnels aux surfaces, on ne peut plus les négliger.

Deuxième règle. — Lorsqu'un fluide est animé d'un mouvement quelconque, mais très-lent, la pression varie sensiblement suivant la loi hydrostatique.

En effet, les mouvements étant très-lents, les frottements et forces d'inertie sont assez faibles et peuvent être négligés sans erreur notable.

Troisième règle. — Lorsqu'une veine fluide s'écoule dans l'air et qu'il existe dans cette veine une section où toutes les molécules ont des vitesses parallèles, la pression en tout point de la section est égale à la pression atmosphérique.

En effet, la pression atmosphérique s'exerce sur tout le pourtour de la veine ; puisque toutes les molécules voisines se meuvent parallèlement les unes aux autres, c'est qu'aucune d'elles n'exerce sur ses voisines un effort de déviation ; elles se pressent également entre elles de toutes parts, et, comme celles du pourtour, reçoivent la pression atmosphérique, il en est de même de toutes les autres.

Lorsque l'on se trouve dans les conditions énoncées à l'une ou à l'autre des règles précédentes, on néglige les frottements, on connait en outre la variation

des pressions, il en résulte que l'équation de Bernoulli ne renferme plus comme inconnue que la vitesse, et elle est alors réellement utile.

Des formules empiriques en hydraulique. — Si l'on examine les propositions précédentes, on s'apercevra qu'elles sont peu nombreuses, et jusqu'à un certain point suspectes au point de vue mathématique. Ce sont cependant les seules que nous puissions exposer dans un traité élémentaire et pratique ; elles trouvent surtout leur justification dans ce fait qu'elles conduisent à des résultats sensiblement vérifiés par l'expérience.

Le lecteur, désireux d'approfondir la question au point de vue théorique, trouvera de précieuses indications dans l'ouvrage de M. Kleitz, inspecteur général des ponts et chaussées, ouvrage intitulé : *Études sur les forces moléculaires des liquides en mouvement avec application à l'hydrodynamique.*

M. l'ingénieur en chef Girardin, dans sa récente *Théorie des moteurs hydrauliques*, a repris la question du mouvement des fluides sous un jour tout nouveau ; il a obtenu par la théorie pure une équation très-simple et mathématiquement vraie, « qui, appliquée aux cas de la pratique, permet de résoudre facilement un grand nombre de questions que soulève l'établissement des machines hydrauliques. » Il a considéré les corps solides, liquides ou gazeux, qui se trouvent en présence dans ces machines, comme une agglomération de molécules disjointes, agissant réciproquement les unes sur les autres et possédant, outre leur mouvement principal, des mouvements vibratoires plus ou moins complexes. En traitant tous ces mouvements par les principes de la mécanique rationnelle, il est arrivé à une équation générale applicable à tous les moteurs hydrauliques.

Toutes ces recherches nouvelles n'ont pas encore passé dans le domaine de la pratique, et les phénomènes de l'hydraulique se traitent toujours par les formules empiriques qui ont été revisées et étudiées avec le plus grand soin, et qui fournissent aujourd'hui des résultats pratiques éminemment utiles.

Nous avons expliqué en mécanique ce qu'il fallait entendre par une loi empirique ; répétons-le ici :

Lorsque deux quantités y et x sont liées par une relation naturelle

$$y=f(x),$$

on peut arriver à développer en série la fonction f, et alors on a :

$$y=m+nx+px^2+qx^3+\ldots+\ldots\ldots$$

Les coefficients m, p, q, de cette série vont presque toujours en diminuant très-rapidement ; et, si l'on ne possède que des valeurs de x assez rapprochées, ce qui arrive souvent dans les expériences de physique, on pourra se contenter d'exprimer (y) par les deux ou trois premiers termes de la fonction, avec une approximation au moins égale aux erreurs possibles d'expérience.

On obtiendra ainsi une relation simple entre les deux variables ; mais il ne faut pas oublier que cette relation simple n'est pas l'expression d'une loi naturelle et générale, et qu'elle ne s'applique qu'entre les limites qui comprennent les expériences adoptées comme point de départ.

Beaucoup de lois physiques, ainsi démontrées entre des intervalles assez petits, ont été généralisées ; on les admettait pour vraies en partant de ce principe que la nature doit faire simple, ce qui est loin d'être exact.

Les lois et formules empiriques sont d'un grand secours en hydraulique, pourvu qu'on s'en serve avec les réserves que nous venons d'exposer.

Il faut remarquer que les lois empiriques appliquées à un liquide offrent beaucoup plus de garantie que lorsqu'elles ont trait à un corps solide.

Un liquide est un corps absolument et constamment homogène; bien des solides, les métaux par exemple, possèdent des propriétés quelquefois très-variables d'un échantillon à l'autre. On risque fort de se tromper, si l'on adopte pour un échantillon de fer les nombres fournis par des expériences sur un autre échantillon. Cela n'est pas à craindre avec un liquide, et c'est un grand avantage au point de vue de l'emploi des formules empiriques.

CHAPITRE II

ÉCOULEMENT DE L'EAU PAR DES ORIFICES A PÉRIMÈTRE FERMÉ. ORIFICES EN MINCE PAROI, AJUTAGES, CONDUITES

Dans ce second chapitre, nous exposerons les règles relatives à l'écoulement de l'eau qui passe dans une section à périmètre fermé, telle que celle d'un tuyau ; dans le chapitre suivant, nous étudierons l'écoulement de l'eau qui passe dans une section à périmètre non fermé, telle que celle d'un canal.

Dans les sections à périmètre fermé, nous distinguerons trois classes :

1° Les orifices en mince paroi, c'est-à-dire ceux qui se réduisent presque à une section plane et qui n'ont qu'une longueur très-faible eu égard aux dimensions de la surface d'écoulement ;

2° Les ajutages, orifices dont la longueur est comparable aux dimensions de la section ; s'il s'agit par exemple d'une section circulaire, et que l'écoulement se fasse par un bout de tube dont la longueur soit égale à deux ou trois fois le diamètre, on est en présence d'un ajutage ;

3° Les tuyaux ou conduites, dont la longueur est incomparablement plus grande que les dimensions de la section.

Ici, nous étudierons tout spécialement l'écoulement par les orifices en mince paroi et par les ajutages, et nous réserverons la question de l'écoulement dans les conduites qui sera mieux placée en tête de notre *Traité de la distribution des eaux*.

1° ORIFICES EN MINCE PAROI

Théorème de Toricelli. — Dès que l'on commença à s'occuper d'expériences sur l'écoulement des eaux, on reconnut que le débit d'un orifice donné (c'est-à-dire le volume liquide qui s'en écoule pendant l'unité de temps) variait avec la hauteur d'eau contenue dans le vase au-dessus de l'orifice ; l'observation vulgaire nous apprend, en effet, que le débit est d'autant plus grand que la charge est plus considérable et que ce débit décroît sans cesse à mesure que le niveau s'abaisse. Pour obtenir un débit constant, il faut maintenir un niveau constant ; c'est à quoi l'on arrive en disposant à la partie supérieure du vase servant à l'expérience un robinet fournissant plus d'eau qu'il ne s'en écoule par l'orifice considéré ; le vase porte sur une de ses faces une échancrure ou déversoir, par

lequel s'écoule constamment l'excès de liquide qui s'échappe du robinet ; de la sorte, le niveau est constant, toutes les circonstances du phénomène le sont aussi et les expériences relatives au débit et à la vitesse d'écoulement s'effectuent facilement.

Enoncé du théorème de Toricelli. — La charge constante au-dessus de l'orifice étant ainsi réalisée, on peut vérifier le théorème de Toricelli, dont voici l'énoncé :

La vitesse d'écoulement de la veine liquide, à la sortie de l'orifice en mince paroi, est indépendante de la densité du liquide et varie proportionnellement à la racine carrée de la charge.

Lorsque la surface supérieure du liquide et la veine qui s'écoule se trouvent toutes les deux soumises à la pression atmosphérique, ce qui est le cas ordinaire, la charge est représentée simplement par une colonne d'eau ayant pour hauteur la différence de niveau entre l'orifice d'écoulement et la surface libre du liquide.

Dans le cas où la pression de l'atmosphère ambiante n'est pas la même à la surface supérieure du liquide que dans l'espace au milieu duquel l'écoulement se produit, il faut ajouter à la hauteur réelle de la colonne d'eau la différence algébrique entre les hauteurs représentatives des deux pressions qui s'exercent l'une au-dessus du liquide dans le vase, l'autre autour de la veine. Exemple : si la pression atmosphérique s'exerce au-dessus du liquide et que la veine s'écoule dans le vide, il faudra ajouter à la hauteur réelle h du liquide, au-dessus de l'orifice, la hauteur représentant la pression atmosphérique, soit $10^m,33$ lorsqu'il s'agit de l'eau ; le total donnera la charge. Si au contraire, l'écoulement se faisait dans l'atmosphère et que le vide existât au-dessus du liquide, il faudrait retrancher de la hauteur réelle h la hauteur représentative de la pression atmosphérique; avec l'eau, cette hauteur est de $10^m,33$; dans ce cas, l'écoulement ne se produirait que si la hauteur h était supérieure à $10^m,33$.

Démonstration du théorème de Toricelli. — 1° Lorsqu'une molécule de poids p tombe d'une hauteur h, le travail produit par la pesanteur est le produit ph du poids par la hauteur de chute, et ce travail est indépendant de la trajectoire qu'a suivie la molécule (page 136 du cours de mécanique). Si la molécule n'est soumise à aucun frottement de la part des surfaces sur lesquelles elle descend, les forces qui la sollicitent se réduisent à la pesanteur, et comme leur travail est égal à la demi-variation de la force vive, si on désigne par v_0 et v les vitesses initiale et finale, on aura l'équation

$$ph = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2).$$

La masse (m) est le rapport du poids (p) à l'accélération (g) de la pesanteur, de sorte que si la vitesse initiale est nulle, l'équation précédente devient :

$$v^2 = 2gh \quad \text{ou} \quad v = \sqrt{2gh}.$$

Elle s'applique exactement aux fluides ; en effet, une molécule descend de la surface libre jusqu'à l'orifice d'écoulement sans éprouver (théoriquement du moins) aucun frottement de la part des molécules qu'elle touche, la seule force qui la sollicite est donc la pesanteur, et l'on peut admettre que la vitesse à la surface du vase est sensiblement nulle ou tout ou moins négligeable en comparaison de la vitesse de la veine à sa sortie de l'orifice en mince paroi. La vitesse

à la sortie, quelle que soit la direction de la veine, est donc facile à obtenir par la formule précédente.

2° La figure 12 permet de procéder à une vérification expérimentale de la formule $v = \sqrt{2gh}$. Soit un orifice percé dans une mince paroi verticale (cd), la veine liquide en sort avec la vitesse horizontale $v = \sqrt{2gh}$ facile à calculer ; mais, si l'on suit une molécule liquide, elle est toujours soumise à l'action de la pesanteur ; en même temps qu'elle est projetée horizontalement, elle tombe verticalement et décrit une parabole située dans un plan vertical.

Au bout du temps t, la molécule a parcouru un espace horizontal (om) $x = vt$ et un espace vertical mn, $y = \frac{gt^2}{2}$.

Fig. 12.

Eliminant t entre ces deux équations, nous aurons la trajectoire d'une molécule, c'est-à-dire la forme même de la veine liquide.

Cette trajectoire est représentée par l'équation :

$$x^2 = \frac{2v^2}{g} \cdot y$$

Accolons à la veine un plan vertical sur lequel nous traçons l'horizontal (ox) prenons sur cette horizontale une longueur arbitraire x, et calculons par l'équation précédente la valeur correspondante de y, nous verrons si cette valeur calculée est bien égale à celle que l'on mesure directement.

C'est en effet ce que vérifie l'expérience ; on a même construit un appareil muni d'anneaux mobiles dans des rainures verticales, on s'arrange de manière à faire passer la veine bien au milieu de chaque anneau ; le profil de la veine se trouve ainsi reproduit d'une manière fixe, on peut tracer la parabole et voir si c'est bien celle que donne l'équation précédente. La valeur que l'on trouve ainsi pour la vitesse est, à 1 ou 2 pour 100 près, celle qui résulte de la formule de Toricelli.

Tout le monde a vu la veine liquide qui, semblable à une baguette de cristal, s'échappe d'un tonneau d'arrosage ; elle ne conserve sa netteté que sur une faible longueur à partir de l'orifice, bientôt les molécules liquides se disjoignent et se mélangent de bulles d'air, la veine perd sa transparence et se résout bientôt en une collection de gouttes distinctes. Cela tient à ce que la vitesse horizontale est peu à peu détruite par les frottements, la chute verticale s'accélère rapidement, l'air pénètre dans la masse liquide et la résout en pluie.

Contraction de la veine. Calcul du débit. — Il y aurait une manière bien simple de vérifier le théorème de Toricelli, ce serait de mesurer la section d'écoulement Ω et de recueillir le liquide qui sort du vase pendant un temps t. Ce volume devrait être égal au produit $\Omega.v.t$ dans lequel on prendrait $v = \sqrt{2gh}$.

Quand on opère ainsi, on trouve constamment un débit inférieur à celui qui résulte du produit précédent ; le débit réel est au débit théorique dans un rapport constant et, s'il s'agit d'orifices de petite dimension, carrés ou circulaires, ce rapport est d'environ 0,62.

L'erreur d'évaluation doit porter soit sur la vitesse, soit sur la section ; on ne

tarde pas à reconnaître que l'on adopte pour la section d'écoulement une valeur trop forte en prenant l'aire de l'orifice percé dans la mince paroi.

En effet, si l'on mêle à l'eau une poussière fine, on reconnait que les filets liquides arrivent à l'orifice en convergeant ; la convergence continue même au delà de l'orifice, et la veine va se rétrécissant jusqu'à une distance assez faible de la paroi ; il se trouve alors une section où tous les filets liquides deviennent parallèles, c'est précisément cette section-là qu'il faudrait prendre pour calculer le débit.

La figure 13 représente le phénomène de la contraction de la veine ; AB étant le diamètre de l'orifice en mince paroi, la veine liquide se présente sous la forme d'un tronc de cône jusqu'à la section (ab) où elle devient cylindrique. L'aire de la section (ab) est environ les $\frac{3}{5}$ ou les 0,62 de la section AB de l'orifice ; c'est ce qui explique la différence que nous trouvions tout à l'heure dans la mesure des volumes débités ; c'est ce qui fait voir en outre que le théorème de Toricelli est bien vrai, pourvu qu'on tienne compte de la contraction de la veine, et qu'on adopte pour la section d'écoulement non pas celle même de l'orifice mais celle de la veine au point où finit la contraction, au point où les filets liquides passant de la convergence au parallélisme, la veine devient de tronc-conique cylindrique. La distance (cd) entre l'orifice et la section minima est environ la moitié du diamètre AB de l'orifice.

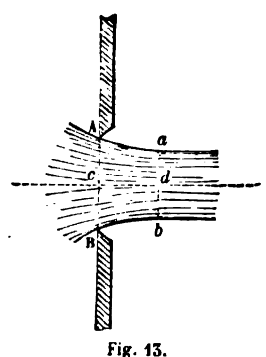


Fig. 13.

Autre démonstration du théorème de Toricelli. — L'observation que nous venons de faire de la contraction de la veine va nous permettre d'appliquer le théorème de Bernoulli à l'écoulement par orifice en mince paroi.

Nous ne connaissons pas la loi de variation des pressions dans le plan de l'orifice même ; mais, dans la section contractée, lorsque tous les filets liquides se meuvent parallèlement, la troisième règle relative au théorème de Bernoulli est applicable.

Cette troisième règle peut être considérée aussi comme applicable à la surface libre du liquide dans le vase, pourvu que la hauteur d'eau ait une valeur notable ; en effet, l'effet de succion qu'exerce l'orifice ne se fait pas sentir au delà d'une faible distance, et on peut admettre qu'à la surface libre du liquide toutes les molécules descendent verticalement avec une vitesse commune v_0.

Désignons par p_0 et p les pressions ambiantes au-dessus du liquide dans le vase et autour de la veine, par z_0 et z les altitudes de la surface libre du liquide et du centre de l'orifice d'écoulement, le théorème de Bernoulli nous donnera l'équation :

$$\frac{v_0^2}{2g}+\frac{p_0}{\pi}+z_0=\frac{v^2}{2g}+\frac{p}{\pi}+z.$$

Généralement, v_0 est sensiblement nulle, parce que la section du vase est très-grande par rapport à celle de l'orifice, les pressions p_0 et p sont égales entre elles et à la pression atmosphérique, et l'équation précédente se réduit à :

$$v^2=2g(z_0-z) \quad \text{ou} \quad v^2=2gh.$$

La vitesse d'écoulement est donc égale à celle d'un corps qui tomberait librement dans le vide d'une hauteur h ; or nous savons qu'un corps lancé de bas en

haut avec une vitesse mesurée par $(\sqrt{2gh})$ remonte précisément à la hauteur h, abstraction faite du frottement; donc, si l'on a recours à un petit ajutage recourbé verticalement, le jet liquide devra s'élever jusqu'au niveau de l'eau dans le vase. C'est en effet ce qui se vérifie d'une manière approximative dans les jets d'eau ; cependant, le niveau du réservoir n'est jamais atteint parce que les frottements et les chocs de l'eau qui retombe contrarient le mouvement ascensionnel.

Calcul du débit. — Le calcul du débit dépend de la valeur du coefficient de contraction, que nous désignerons par (m) ; ce coefficient est le rapport de la section contractée (ab) à la section AB de l'orifice en mince paroi.

Le débit Q à la seconde est donné par la formule.

$$Q = m.\Omega.\sqrt{2gh}$$

Dans les orifices à mince paroi de petite surface et de dimensions à peu près égales en tous sens, le coefficient (m) est sensiblement égal à 0,62, et la formule précédente devient

$$Q = 0{,}62.\Omega.\sqrt{2gh} = 4{,}43.\Omega.\sqrt{h}$$

Il est facile de vérifier expérimentalement que, toutes choses égales d'ailleurs, le débit varie d'une manière à peu près proportionnelle à la section de l'orifice.

Cependant, cette loi n'est qu'empirique, et en réalité, le débit varie avec la section parce qu'il en est de même des frottements, et les petits orifices donnent, à égalité de charge, moins d'eau que les grands, parce que l'influence du frottement à la périphérie y est relativement plus considérable.

De même, la contraction de la veine n'est pas chose constante; elle diminue avec la charge, et la contraction ne serait plus la même avec une très-grosse charge qu'avec une charge faible.

C'est ce que nous allons reconnaître en donnant les résultats des expériences de MM. Poncelet et Lesbros.

Expériences sur la contraction de la veine. — Les premières expériences faites en grand datent de 1827 et 1828, on les doit à MM. Poncelet et Lesbros. Elles ont été exécutées au moyen d'un vaste bassin dans lequel on maintenait un niveau constant grâce à une dérivation de la Moselle. L'orifice d'écoulement était un rectangle dont la base horizontale avait $0^{m},20$; on pouvait faire varier à volonté la hauteur au moyen d'une petite vanne mobile. L'eau qui s'échappait de cet orifice était recueillie dans un grand réservoir de jauge, et le coefficient de contraction (m) s'obtenait en prenant le rapport de la dépense réelle à la dépense qui se produirait si la contraction n'existait pas.

L'orifice d'écoulement était ouvert dans une lame de cuivre et la vanne mobile était elle-même en cuivre, afin de bien réaliser l'orifice en mince paroi.

Des expériences de MM. Poncelet et Lesbros il résulte que :

1° Les coefficients de contraction varient d'autant moins entre eux pour des orifices différents que les charges d'eau sont plus considérables ;

2° Le coefficient de contraction augmente toujours à mesure que la charge devient moindre ;

3° Ce coefficient a sa plus grande valeur, pour des orifices de section égale, lorsque ces orifices sont ouverts par le haut et forment déversoirs.

Les expérimentateurs n'ont pas remarqué que la température influe sur les résultats obtenus.

Ils ont relevé la forme de la veine au moyen de châssis horizontaux et verti-

caux ; dans ces châssis se meuvent des aiguilles mobiles dont on fait effleurer la pointe avec la surface de la veine ; on obtient de la sorte autant de sections horizontales et verticales que l'on veut et l'on peut reproduire la forme de la veine en bois ou en pierre.

A 0^m,50 au delà de l'orifice, la veine perdait de sa netteté et se résolvait en gerbe confuse.

Avec un orifice carré de 0^m,20 de côté, la plus grande contraction de la veine s'est trouvée à 0^m,30 du plan de l'orifice ; la surface de la veine était alors de 225 centimètres carrés, celle de l'orifice étant de 400 centimètres carrés.

Dans un mémoire publié en 1836, le capitaine Lesbros s'exprime ainsi :

« Pour le cas des orifices percés en minces parois planes et complétement isolés des faces du réservoir, on admet généralement que le coefficient de correction varie avec la charge pour le même orifice et, pour une même charge, avec les dimensions de l'orifice.

« Ainsi, d'après Mariotte et Bossut, le coefficient de contraction est de 0,65 ou 0^m,66 pour une charge d'une ligne sur l'orifice, tandis que, pour des charges qui dépassent cent fois le diamètre de cet orifice, Bossut n'a obtenu que 0,62.

« D'autres observateurs, en opérant sur des orifices de grandeurs inégales et avec des charges qui ont varié depuis dix fois jusqu'à trois cents fois les diamètres de ces orifices, n'ont trouvé pour le coefficient de correction que des valeurs sensiblement constantes et qui s'écartent très-peu de la moyenne 0,62. Mais il est évident que le coefficient ne peut passer brusquement de la valeur 0,66, qui concerne les charges d'une ligne à celle de 0,62 qui concerne les fortes charges, et que des variations doivent se faire sentir pour les charges intermédiaires, qui sont précisément celles qu'on rencontre le plus souvent dans la pratique et qui intéressent particulièrement le jaugeage des cours d'eau. Ainsi de nouvelles expériences devenaient indispensables.

Quant aux variations dues au changement de grandeur de l'orifice, le coefficient doit être, d'après Hachette, de 0,78 pour les orifices au-dessous de 0^m,001 de diamètre ; de 0,69 à 0,74 pour les orifices de 0^m,01, et 0^m,02 d'après Mariotte et Newton ; de 0,60 à 0,62 pour les orifices supérieurs à 0^m,02 suivant d'autres observateurs. Or, il est évident que le coefficient ne peut sauter brusquement d'une valeur à l'autre et qu'il doit passer par des valeurs intermédiaires qu'il est important de rechercher. »

Cette recherche a été faite par MM. Poncelet et Lesbros, dans les expériences dont nous avons indiqué ci-dessus la marche générale.

M. Lesbros a fait une étude approfondie du phénomène connue sous le nom d'inversion de la veine :

La veine, en se contractant, ne conserve pas une section semblable à celle de l'orifice qui lui a donné naissance, elle se déforme peu à peu et sa section se modifie complétement. Exemple : les figures 1 et 2 de la planche B, empruntées au mémoire de M. Lesbros, montrent l'élévation latérale et les projections sur le plan de l'orifice d'une série de sections successives de la veine qui s'échappe d'un orifice carré de 0^m,20 de côté ; les angles du carré se trouvent d'abord remplacés par de petites faces concaves, qui vont en augmentant, si bien qu'en *cc'*, à 0^m,15 de l'orifice, la section est un octogone régulier à faces concaves ; puis les faces, nées sur les angles du carré primitif augmentent encore aux dépens des côtés de ce carré, qui finissent par disparaître ; à ce moment, on se trouve en *kk'*, à 0^m,50 de l'orifice, la section de la veine est un carré dont une diagonale est verticale et dont les côtés sont concaves.

Le phénomène est encore plus complexe lorsque l'écoulement se produit à travers une fente verticale; la veine liquide affecte alors, d'après M. Lesbros, les formes représentées par la figure 14 ; l'âme de la veine tend à s'amincir

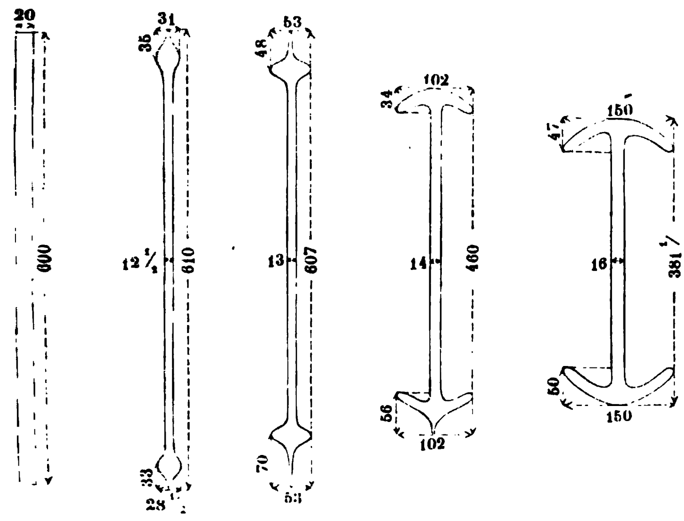


Fig. 14.

tandis que les molécules liquides s'accumulent au sommet et à la base pour y former des bourrelets qui s'étalent horizontalement.

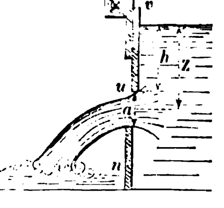
On doit attribuer ce phénomène à l'action réciproque des filets liquides ; ces filets, soumis à des charges et à des frottements distincts, tendent à décrire chacun une parabole différente et, comme ils restent réunis, ils réagissent les uns sur les autres, ils modifient sans cesse la section de la veine.

Formules donnant le débit des vannes. — C'est d'après les expériences de Poncelet et Lesbros qu'on a établi les formules qui servent à calculer les débits des vannes.

Dans une paroi verticale (mn) est ménagé un orifice rectangulaire de largeur l derrière lequel se meut une vanne verticale (uv) qui laisse sous son bord inférieur une hauteur (a) pour l'écoulement de l'eau.

La surface d'écoulement A est donnée par le produit (al).

La charge d'eau au sommet de l'orifice est (h) et la charge au centre de l'orifice est $\left(h + \frac{a}{2}\right)$ ou z ; la vitesse d'écoulement est égale à $\sqrt{2gz}$ d'après le théorème de Torricelli, et, si l'on appelle (m) le coefficient de correction, le débit Q se calcule par la formule :



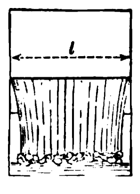


Fig. 15.

$$Q = m.A.\sqrt{2gz} \qquad (1)$$

La table suivante donne la valeur de (m) en regard de la valeur de la charge (h) sur le sommet de l'orifice.

HAUTEUR a DE L'ORIFICE	CHARGE h AU SOMMET DE L'ORIFICE	COEFFIC. m DE CORRECTION	HAUTEUR a DE L'ORIFICE	CHARGE h AU SOMMET DE L'ORIFICE	COEFFIC. m DE CORRECTION	HAUTEUR a DE L'ORIFICE	CHARGE h AU SOMMET DE L'ORIFICE	COEFFIC. m DE CORRECTION
mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres	mètres
0.20	0.017	0.569	0.05	0.009	0.606	0.02	0.006	0.661
»	0.022	0.573	»	0.011	0.609	»	0.010	0.660
»	0.060	0.587	»	0.022	0.617	»	0.101	0.654
»	0.141	0.593	»	0.081	0.628	»	0.382	0.642
»	0.300	0.600	»	0.187	0.630	»	0.975	0.652
»	0.469	0.602	»	0.452	0.628	»	1.342	0.624
»	0.852	0.604	»	1.056	0.624	»	1.364	0.623
»	1.125	0.602	»	1.661	0.617	»	1.390	0.621
»	1.215	0.604	»	1.665	0.617	»	3.000	0.608
»	1.332	0.605	»	3.000	0.606			
»	1.372	0.605						
»	3.000	0.601	0.03	0.005	0.626	0.01	0.005	0.706
			»	0.007	0.631	»	0.012	0.699
			»	0.042	0.640	»	0.034	0.679
0.10	0.013	0.592	»	0.192	0.634	»	0.190	0.656
»	0.064	0.607	»	0.450	0.631	»	0.493	0.643
»	0.452	0.617	»	0.461	0.631	»	0.988	0.629
»	0.957	0.615	»	1.079	0.626	»	1.321	0.619
»	1.505	0.611	»	1.366	0.622	»	1.397	0.619
»	3.000	0.603	»	3.000	0.607	»	3.000	0.609

Exemple : Quel est le débit d'une vanne verticale de $0^{m},80$ de large, donnant passage à une masse liquide de $0^{m},15$ de haut, la charge d'eau sur le sommet de l'orifice étant de $1^{m},40$?

La section d'écoulement A est égale à

$$0^{m},80 \times 0,15 = 0^{mq},12 ;$$

la charge z sur le centre de l'orifice est

$$1^{m},40 + 0,075 = 1^{m},475 ;$$

il en résulte pour la vitesse d'écoulement la valeur

$$\sqrt{2gz} = 4,43\sqrt{z} = 4,43 \times 1,21 = 5,36$$

La dépense, si la contraction n'existait pas, serait donc :

$$0^{mq},12 \times 5^{m},36 = 0^{mc},643.$$

ou 643 litres à la seconde.

Mais, cette dépense est affectée d'un coefficient de correction (m), qui, d'après le tableau précédent, est de 0,61, de sorte que le débit réel est de :

$$0,643 \times 0,61 = 0^{mc},392.$$

ou de 392 litres à la seconde.

Le tableau des coefficients de correction nous apprend que, pour une hauteur donnée de l'orifice, le coefficient commence par augmenter à mesure que la charge s'accroît, il atteint un maximum, puis va en décroissant à mesure que les charges augmentent.

En moyenne, on pourra sans grande erreur adopter pour le coefficient de correction une valeur constante et égale à 0,62.

On ne risquera de commettre une erreur que dans le cas des charges très-ré-

duites ou des orifices de faible hauteur, et alors on se guidera sur les nombres contenus au tableau précédent.

Calcul du temps qu'un vase plein d'eau met à se vider. — Comme application des lois de l'écoulement en mince paroi, cherchons le temps que mettra à se vider un réservoir cylindrique de hauteur h et de diamètre d, à la base duquel est percé un orifice de section A.

Lorsque le niveau de l'eau dans le réservoir est à la hauteur x, la vitesse d'écoulement est $\sqrt{2gx}$ et le débit pendant le temps dt est :

$$m.A.dt.\sqrt{2gx}$$

pendant le même temps, le niveau de l'eau dans le réservoir s'est abaissé de dx, et il a disparu un volume d'eau égal à

$$\frac{\pi d^2}{4}.dx.$$

Égalant les deux volumes, il vient :

$$dt = \frac{\pi d^2}{4m.A\sqrt{2g}}.\frac{dx}{\sqrt{x}}$$

L'intégrale de $\left(\frac{dx}{\sqrt{x}}\right)$ ou de $x^{-\frac{1}{2}}dx$ est égale à $2x^{\frac{1}{2}}$ ou $2\sqrt{x}$; prenant cette intégrale depuis $x = h$ jusqu'à $x = 0$, nous trouvons pour la valeur du temps correspondant :

$$t = \frac{2.\pi d^2}{4.m.A.\sqrt{2g}}\sqrt{h}.$$

Exemple : Quel temps mettra à se vider un réservoir de 3 mètres de haut, de 2 mètres de diamètre, percé à sa base d'un orifice carré de $0^m,01$ de côté?

La surface A est égale à 0,0001, et la formule précédente devient :

$$t = \frac{2 \times 3,14 \times 4}{4 \times 0,62 \times 0,0001 \times 4,43}\sqrt{3} = 39,635 \text{ secondes, ou } 660',35'', \text{ ou encore } 11^h,35''.$$

On a souvent à calculer en hydraulique la formule $\sqrt{2gh}$, et il est commode à cet effet de dresser une table qui donne en fonction de h la valeur numérique de cette formule.

On trouvera dans le recueil de tables de Genieys et Cousinery les vitesses correspondant à des hauteurs variant de millimètre en millimètre depuis zéro jusqu'à 5 mètres. Dans la pratique, il suffit bien d'avoir les vitesses correspondant à des hauteurs variant de centimètre en centimètre, elles sont inscrites à la table suivante :

TABLE DE LA VITESSE v DUE A UNE HAUTEUR DE CHUTE h

$$v = \sqrt{2gh} = 4{,}429177\sqrt{h}$$

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
0,001	0,140	0,45	2,971	0,98	4,384	1,51	5,443	2,04	6,326
0,002	0,198	0,46	3,004	0,99	4,407	1,52	5,461	2,05	6,341
0,003	0,243	0,47	3,037	1,00	4,429	1,53	5,479	2,06	6,357
0,004	0,280	0,48	3,069	1,01	4,451	1,54	5,496	2,07	6,372
0,005	0,313	0,49	3,100	1,02	4,473	1,55	5,514	2,08	6,388
0,006	0,343	0,50	3,132	1,03	4,495	1,56	5,532	2,09	6,403
0,007	0,370	0,51	3,163	1,04	4,517	1,57	5,550	2,10	6,418
0,008	0,395	0,52	3,194	1,05	4,539	1,58	5,567	2,11	6,434
0,009	0,420	0,53	3,224	1,06	4,560	1,59	5,585	2,12	6,449
0,01	0,443	0,54	3,253	1,07	4,582	1,60	5,603	2,13	6,464
0,02	0,626	0,55	3,285	1,08	4,603	1,61	5,620	2,14	6,479
0,03	0,767	0,56	3,314	1,09	4,624	1,62	5,637	2,15	6,494
0,04	0,886	0,57	3,344	1,10	4,645	1,63	5,655	2,16	6,510
0,05	0,990	0,58	3,373	1,11	4,666	1,64	5,672	2,17	6,525
0,06	1,085	0,59	3,402	1,12	4,687	1,65	5,690	2,18	6,540
0,07	1,172	0,60	3,431	1,13	4,708	1,66	5,707	2,19	6,555
0,08	1,253	0,61	3,459	1,14	4,729	1,67	5,724	2,20	6,570
0,09	1,329	0,62	3,488	1,15	4,750	1,68	5,741	2,21	6,584
0,10	1,401	0,63	3,516	1,16	4,770	1,69	5,758	2,22	6,599
0,11	1,468	0,64	3,543	1,17	4,790	1,70	5,775	2,23	6,614
0,12	1,534	0,65	3,571	1,18	4,811	1,71	5,792	2,24	6,629
0,13	1,597	0,66	3,598	1,19	4,831	1,72	5,809	2,25	6,644
0,14	1,657	0,67	3,625	1,20	4,852	1,73	5,826	2,26	6,658
0,15	1,715	0,68	3,652	1,21	4,872	1,74	5,842	2,27	6,673
0,16	1,772	0,69	3,679	1,22	4,892	1,75	5,859	2,28	6,688
0,17	1,826	0,70	3,706	1,23	4,913	1,76	5,876	2,29	6,703
0,18	1,879	0,71	3,732	1,24	4,933	1,77	5,893	2,30	6,717
0,19	1,931	0,72	3,758	1,25	4,953	1,78	5,909	2,31	6,732
0,20	1,981	0,73	3,784	1,26	4,972	1,79	5,926	2,32	6,746
0,21	2,030	0,74	3,810	1,27	4,991	1,80	5,942	2,33	6,761
0,22	2,078	0,75	3,836	1,28	5,011	1,81	5,959	2,34	6,775
0,23	2,124	0,76	3,861	1,29	5,031	1,82	5,975	2,35	6,790
0,24	2,170	0,77	3,886	1,30	5,050	1,83	5,992	2,36	6,804
0,25	2,215	0,78	3,911	1,31	5,069	1,84	6,008	2,37	6,819
0,26	2,259	0,79	3,936	1,32	5,089	1,85	6,024	2,38	6,833
0,27	2,301	0,80	3,961	1,33	5,108	1,86	6,041	2,39	6,847
0,28	2,344	0,81	3,986	1,34	5,127	1,87	6,057	2,40	6,862
0,29	2,385	0,82	4,011	1,35	5,146	1,88	6,073	2,41	6,876
0,30	2,426	0,83	4,035	1,36	5,165	1,89	6,089	2,42	6,890
0,31	2,466	0,84	4,059	1,37	5,184	1,90	6,105	2,43	6,904
0,32	2,506	0,85	4,083	1,38	5,203	1,91	6,122	2,44	6,919
0,33	2,544	0,86	4,107	1,39	5,222	1,92	6,138	2,45	6,933
0,34	2,582	0,87	4,131	1,40	5,241	1,93	6,154	2,46	6,947
0,35	2,620	0,88	4,155	1,41	5,259	1,94	6,170	2,47	6,961
0,36	2,658	0,89	4,178	1,42	5,278	1,95	6,186	2,48	6,975
0,37	2,694	0,90	4,202	1,43	5,297	1,96	6,202	2,49	6,989
0,38	2,730	0,91	4,225	1,44	5,315	1,97	6,217	2,50	7,003
0,39	2,766	0,92	4,248	1,45	5,333	1,98	6,232	2,51	7,017
0,40	2,801	0,93	4,271	1,46	5,351	1,99	6,248	2,52	7,031
0,41	2,836	0,94	4,294	1,47	5,370	2,00	6,264	2,53	7,045
0,42	2,870	0,95	4,317	1,48	5,388	2,01	6,279	2,54	7,059
0,43	2,904	0,96	4,340	1,49	5,406	2,02	6,295	2,55	7,073
0,44	2,938	0,97	4,362	1,50	5,425	2,03	6,311	2,56	7,087

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
2,57	7,101	3,14	7,849	3,71	8,531	4,28	9,163	4,85	9,754
2,58	7,114	3,15	7,861	3,72	8,543	4,29	9,174	4,86	9,764
2,59	7,128	3,16	7,873	3,73	8,554	4,30	9,185	4,87	9,774
2,60	7,142	3,17	7,886	3,74	8,566	4,31	9,195	4,88	9,784
2,61	7,156	3,18	7,898	3,75	8,577	4,32	9,206	4,89	9,794
2,62	7,169	3,19	7,911	3,76	8,588	4,33	9,217	4,90	9,804
2,63	7,183	3,20	7,923	3,77	8,600	4,34	9,227	4,91	9,814
2,64	7,197	3,21	7,936	3,78	8,611	4,35	9,238	4,92	9,824
2,65	7,210	3,22	7,948	3,79	8,623	4,36	9,248	4,93	9,834
2,66	7,224	3,23	7,960	3,80	8,634	4,37	9,259	4,94	9,844
2,67	7,237	3,24	7,973	3,81	8,645	4,38	9,270	4,95	9,854
2,68	7,251	3,25	7,985	3,82	8,657	4,39	9,280	4,96	9,864
2,69	7,265	3,26	7,997	3,83	8,668	4,40	9,291	4,97	9,874
2,70	7,278	3,27	8,009	3,84	8,679	4,41	9,301	4,98	9,884
2,71	7,291	3,28	8,022	3,85	8,691	4,42	9,312	4,99	9,894
2,72	7,305	3,29	8,034	3,86	8,702	4,43	9,322	5,00	9,904
2,73	7,318	3,30	8,046	3,87	8,713	4,44	9,333	5,25	10,149
2,74	7,332	3,31	8,058	3,88	8,725	4,45	9,343	5,50	10,387
2,75	7,345	3,32	8,070	3,89	8,736	4,46	9,354	5,75	10,621
2,76	7,358	3,33	8,082	3,90	8,747	4,47	9,364	6,00	10,849
2,77	7,372	3,34	8,095	3,91	8,758	4,48	9,375	6,25	11,073
2,78	7,385	3,35	8,107	3,92	8,769	4,49	9,385	6,50	11,292
2,79	7,398	3,36	8,119	3,93	8,780	4,50	9,396	6,75	11,507
2,80	7,411	3,37	8,131	3,94	8,792	4,51	9,406	7,00	11,718
2,81	7,425	3,38	8,143	3,95	8,803	4,52	9,417	7,25	11,926
2,82	7,437	3,39	8,155	3,96	8,814	4,53	9,427	7,50	12,130
2,83	7,451	3,40	8,167	3,97	8,825	4,54	9,437	7,75	12,330
2,84	7,464	3,41	8,179	3,98	8,836	4,55	9,448	8,00	12,528
2,85	7,477	3,42	8,191	3,99	8,847	4,56	9,458	8,25	12,722
2,86	7,490	3,43	8,203	4,00	8,858	4,57	9,468	8,50	12,913
2,87	7,503	3,44	8,215	4,01	8,869	4,58	9,479	8,75	13,102
2,88	7,517	3,45	8,227	4,02	8,880	4,59	9,489	9,00	13,288
2,89	7,530	3,46	8,239	4,03	8,892	4,60	9,500	9,25	13,471
2,90	7,543	3,47	8,251	4,04	8,903	4,61	9,510	9,50	13,652
2,91	7,556	3,48	8,263	4,05	8,914	4,62	9,520	9,75	13,830
2,92	7,569	3,49	8,274	4,06	8,925	4,63	9,530	10,00	14,006
2,93	7,582	3,50	8,286	4,07	8,936	4,64	9,541	11,00	14,690
2,94	7,594	3,51	8,298	4,08	8,946	4,65	9,551	12,00	15,343
2,95	7,607	3,52	8,310	4,09	8,957	4,66	9,561	13,00	15,970
2,96	7,620	3,53	8,322	4,10	8,968	4,67	9,572	14,00	16,572
2,97	7,633	3,54	8,333	4,11	8,979	4,68	9,582	15,00	17,154
2,98	7,646	3,55	8,345	4,12	8,990	4,69	9,592	16,00	17,717
2,99	7,659	3,56	8,357	4,13	9,001	4,70	9,602	17,00	18,257
3,00	7,672	3,57	8,369	4,14	9,012	4,71	9,612	18,00	18,791
3,01	7,684	3,58	8,380	4,15	9,023	4,72	9,623	19,00	19,306
3,02	7,697	3,59	8,392	4,16	9,034	4,73	9,633	20,00	19,808
3,03	7,710	3,60	8,404	4,17	9,045	4,74	9,643	21,00	20,297
3,04	7,722	3,61	8,415	4,18	9,055	4,75	9,653	22,00	20,775
3,05	7,735	3,62	8,427	4,19	9,066	4,76	9,663	23,00	21,242
3,06	7,748	3,63	8,439	4,20	9,077	4,77	9,673	24,00	21,698
3,07	7,760	3,64	8,450	4,21	9,088	4,78	9,684	25,00	22,146
3,08	7,773	3,65	8,462	4,22	9,099	4,79	9,694	26,00	22,584
3,09	7,786	3,66	8,474	4,23	9,109	4,80	9,704	27,00	23,015
3,10	7,798	3,67	8,485	4,24	9,120	4,81	9,714	28,00	23,437
3,11	7,811	3,68	8,497	4,25	9,131	4,82	9,724	29,00	23,852
3,12	7,823	3,69	8,508	4,26	9,142	4,83	9,734	30,00	24,260
3,13	7,836	3,70	8,520	4,27	9,152	4,84	9,744	31,00	24,661

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
32	25,055	54	32,548	76	38,613	98	43,847	200	62,638
33	25,444	55	32,848	77	38,866	99	44,070	205	63,416
34	25,826	56	33,145	78	39,117	100	44,292	210	64,185
35	26,203	57	33,440	79	39,367	105	45,386	215	64,944
36	26,575	58	33,732	80	39,616	110	46,454	220	65,695
37	26,942	59	34,021	81	39,863	115	47,498	225	66,438
38	27,303	60	34,308	82	40,108	120	48,519	230	67,171
39	27,660	61	34,593	83	40,352	125	49,520	235	67,898
40	28,013	62	34,875	84	40,594	130	50,500	240	68,616
41	28,361	63	35,155	85	40,835	135	51,462	245	69,328
42	28,704	64	35,433	86	41,074	140	52,407	250	70,031
43	29,044	65	35,709	87	41,313	145	53,334	255	70,728
44	29,380	66	35,983	88	41,549	150	54,246	260	71,418
45	29,712	67	36,254	89	41,785	155	55,143	265	72,102
46	30,040	68	36,524	90	42,019	160	56,025	270	72,780
47	30,365	69	36,791	91	42,252	165	56,894	275	73,450
48	30,686	70	37,057	92	42,483	170	57,749	280	74,114
49	31,004	71	37,321	93	42,713	175	58,592	285	74,773
50	31,329	72	37,583	94	42,942	180	59,424	290	75,426
51	31,631	73	37,843	95	43,170	185	60,243	295	76,074
52	31,939	74	38,101	96	43,397	190	61,052	300	76,716
53	32,245	75	38,358	97	43,622	195	61,850		

2° AJUTAGES

Les ajutages sont intermédiaires entre les orifices en mince paroi et les tuyaux de conduite; ce sont des orifices dont la longueur est comparable aux dimensions de la section; s'il s'agit, par exemple, d'une section circulaire et que l'écoulement se fasse par un bout de tube dont la longueur soit égale à une, deux ou trois fois le diamètre, on est en présence d'un ajutage.

Nous étudierons : 1° l'ajutage parfaitement évasé; 2° l'ajutage rentrant de Borda ; 3° l'ajutage cylindrique; 4° les ajutages coniques.

1° AJUTAGE PARFAITEMENT ÉVASÉ

Soit une paroi (mn) dans laquelle est ménagé un orifice ($abcd$) dont le profil est identique à celui que prendrait une veine sortant de l'orifice (ab) percé en mince paroi et ayant sa section minima en (cd). Les filets liquides qui traversent (cd) sont donc parallèles entre eux, la veine est cylindrique au delà de (cd) et si on désigne par A l'aire de cette ouverture, le débit sera :

$$Av = A\sqrt{2gh}$$

Fig. 16.

C'est en effet ce que vérifie l'expérience : la dépense réelle est environ les 98 centièmes de la quantité précédente. La différence porte, non sur la section, mais sur la vitesse qui,

par suite des frottements, reste un peu au-dessous de sa valeur théorique.

D'après ce que nous avons vu, l'ajutage parfaitement évasé sera réalisé si la section (cd) est égale à 0,62 de la section (ab) et si la distance horizontale de ces deux sections est à peu près égale à la moitié du diamètre (ab).

Autrement dit, dans le cas de sections circulaires, les lignes ab, cd, mn sont entre elles comme les nombres 10, 8, 5.

L'utilité de l'ajutage parfaitement évasé n'est pas considérable ; il donne le même débit que l'orifice en mince paroi de section (ab) ; la veine qui s'en écoule est peut-être un peu plus régulière.

2° AJUTAGE RENTRANT DE BORDA

L'ajutage rentrant de Borda, figure 17, est un bout de tube cylindrique ($mnpq$) faisant saillie à l'intérieur d'un réservoir ($abgh$).

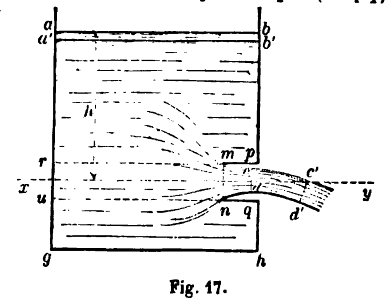


Fig. 17.

Considérons l'écoulement arrivé à l'état permanent : pendant un temps infiniment petit θ, le niveau du réservoir s'abaisse de (ab) en ($a'b'$) et les molécules liquides de la section contractée minima (cd) sont chassées jusqu'en $c'd'$, de telle sorte que le volume $aba'b'$ est égal au volume $cdc'd'$.

Soit s l'aire de la section contractée cd, v la vitesse d'écoulement dans cette section, π la densité du liquide, la masse du liquide qui s'écoule dans l'unité de temps est

$$\frac{\pi}{g}.s.v.\theta.$$

Appliquons à la masse entière du liquide le théorème des quantités de mouvement dont voici l'énoncé :

« L'accroissement algébrique de la somme des quantités de mouvement de tous les points d'un système, projetées sur un axe, est égale à la somme des impulsions totales de toutes les forces agissant sur le système, projetées sur le même axe. »

Prenons pour axe de projection l'horizontale xy passant par le centre de l'orifice.

Pour obtenir l'accroissement des quantités de mouvement, il faut calculer la quantité de mouvement du système ($abcd$), puis la quantité de mouvement du système $a'b'c'd'$ et en faire la différence ; or, les deux systèmes ont une partie commune $a'b'cd$ qui, en vertu de la permanence, possède une quantité de mouvement invariable.

L'accroissement de la quantité de mouvement se réduit donc à la différence entre la quantité de mouvement de la masse $cdc'd'$ et celle de la masse ($aba'b'$) ; pour toutes les molécules de cette dernière les vitesses sont verticales, c'est-à-dire normales à l'axe de projection xy, elles ont donc sur cet axe une projection nulle et l'accroissement algébrique de la projection des quantités de mou-

vement se réduit à :

$$\left(\frac{\pi}{g}.s.v.\theta\right)v \quad \text{ou} \quad \frac{\pi}{g}s.v^2.\theta$$

Cherchons maintenant les impulsions des forces qui agissent sur le système $(abcd)$; la pesanteur et la pression atmosphérique (p) qui s'exerce sur (ab) sont des forces verticales et la projection de leurs impulsions sur l'axe xy est nulle. Les réactions des parois sur les liquides sont partout équilibrées par des réactions égales et directement opposées, si ce n'est pour la portion de paroi (ru) découpée par le prolongement de l'ajutage sur la paroi qui lui est opposée; cette portion de paroi a une section A égale à celle de l'ajutage, elle est soumise à la pression $A(p+\pi h)$ et donne lieu par conséquent à une impulsion

$$A(p+\pi h)\theta;$$

Sur le contour *mcdn* de la veine et sur sa section contractée (cd) s'exerce la pression atmosphérique; en projection verticale le contour $(mcdn)$ couvre la section tout entière (mn) de l'ajutage, et la résultante des actions de la pression atmosphérique sur ce contour est égale à la résultante des actions de la même pression atmosphérique (p) sur la section *mn* ou A. Il en résulte une impulsion $-p.A.\theta$.

Écrivant l'égalité entre des quantités de mouvement et les impulsions, il vient :

$$\frac{\pi}{g}s.v^2\theta = A\theta\left\{p+\pi h-p\right\}, \quad \text{qui donne :} \quad \frac{sv^2}{g}=Ah.$$

D'autre part il résulte du théorème de Bernoulli que $v^2=2gh$; divisant ces deux équations l'une par l'autre, il vient :

$$s=\frac{A}{2}.$$

Ainsi, la section contractée minima est juste la moitié de la section de l'ajutage, et le débit réel est la moitié du débit qu'on obtiendrait en multipliant la section de l'ajutage par la vitesse d'écoulement.

Les expériences de Borda ont vérifié l'exactitude de ce résultat simple.

Au premier abord on peut ne pas saisir nettement la différence entre l'ajutage rentrant de Borda et l'orifice en mince paroi et on peut se demander pourquoi nous n'avons pas appliqué à l'orifice en mince paroi le calcul précédent.

Cela s'explique si l'on considère que dans l'écoulement en mince paroi les molécules qui s'échappent glissent le long des parois *bp*, *hq*; le liquide qui touche ces parois, étant animé d'une certaine vitesse, perd une partie correspondante de sa pression et par conséquent ne reste plus à la pression hydrostatique; cependant celle-ci se maintient toujours sur la paroi opposée où les mouvements sont très-lents; il n'y a plus compensation entre les réactions des parois opposées, et ces réactions inconnues interviendraient dans l'équation des quantités de mouvement. Au contraire, avec l'ajutage rentrant, les molécules qui s'écoulent proviennent du centre de la masse liquide et non du voisinage des parois; le liquide compris dans les angles (mpb), (nqh) est sensiblement immobile et reste soumis à la loi des pressions hydrostatiques.

L'ajutage rentrant de Borda n'a guère d'applications pratiques; il réduit la dépense de l'orifice en mince paroi, mais il a l'avantage sur ce dernier de

donner une veine qui se conserve plus longtemps régulière, aussi y a-t-on recours dans quelques appareils tels que les tonneaux de porteurs d'eau.

Orifices imparfaitement évasés. — Nous avons vu que, lorsqu'un orifice était parfaitement évasé, c'est-à-dire profilé comme la veine qui sort d'une mince paroi, le coefficient de réduction était égal à l'unité, c'est-à-dire que la dépense était le produit de la section de sortie par la vitesse.

Si on ne réalise pas l'évasement parfait, on aura un coefficient de correction intermédiaire entre l'unité et le nombre 0,62 qui correspond à la mince paroi.

Soit un orifice en mince paroi (ab) de forme rectangulaire; le bord inférieur est prolongé à l'intérieur du liquide par une languette horizontale (bc) ; cette languette a pour effet d'empêcher l'afflux des filets liquides qui touchent les parois et de diminuer la contraction de la veine, il en résulte donc une augmentation du débit.

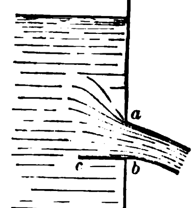


Fig. 18.

Bidone, qui avait étudié ce phénomène, avait donné pour déterminer le coefficient de correction la formule suivante :

$$m = 0{,}62\left(1 + 0{,}15\frac{N}{P}\right)$$

dans laquelle P est le périmètre total de l'orifice et N la portion de ce périmètre qui est obstruée par un prolongement intérieur tel que (bc).

Cette formule de Bidone est évidemment inexacte, ou du moins ne saurait s'appliquer dès que $\frac{N}{P}$ est voisin de l'unité; en effet, elle donnerait alors pour (m) la valeur 0,73 et nous venons de trouver que, dans le cas de l'ajutage rentrant de Borda, le coefficient de correction est seulement égal à 0,50.

M. Lesbros a montré que la loi de Bidone se vérifiait, c'est-à-dire que la dépense augmentait avec la fraction de périmètre obstruée; il a résumé ses expériences dans des tableaux que nous donnerons plus loin.

Orifices parfaitement évasés suivis d'un coursier. — Soit un orifice rectangulaire (ab) parfaitement évasé, c'est-à-dire tel que la contraction est supprimée et que tous les filets liquides qui sortent par (ab) sont parallèles; cet orifice est suivi d'un canal ouvert de même largeur que lui, ce canal porte le nom de coursier.

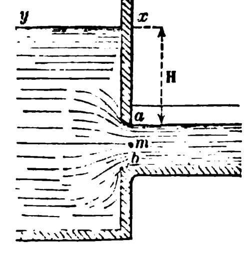


Fig. 19.

D'après la troisième règle relative au théorème de Bernoulli, lorsque toutes les molécules liquides d'une même section ont des vitesses parallèles, les pressions varient dans cette section suivant la loi hydrostatique.

Actuellement, faisant abstraction de la pression atmosphérique qui s'exerce au-dessus du réservoir comme au-dessus du coursier, un point (m) de la section (ab) est soumis d'un côté à une charge (ma), de l'autre à une charge mx, d'où résulte une charge effective égale à (ax) ou H. Ainsi, la charge et par suite la vitesse est constante dans toute l'étendue de la section (ab) ou A et elle s'obtient en prenant la charge sur le sommet de l'orifice; dans le cas de l'écoulement à l'air libre, en l'absence de coursier, la charge est au contraire représentée par la hauteur d'eau qui règne au-dessus du centre de gravité de l'orifice; la vitesse est donc plus considérable.

Vannes de fond. — Les vannes de fond sont celles qu'on rencontre le plus fréquemment dans la pratique ; ce sont des plans verticaux ou inclinés engagés dans un coursier à parois verticales ; lorsqu'elles sont levées elles laissent passer sous elles une tranche d'eau qui s'en va par le coursier.

Il y a avantage à obtenir le plus grand débit possible avec la moindre section possible ; il faut donc s'attacher à réduire autant que possible la contraction latérale. On y arrive en adoptant des vannes inclinées, mais il serait plus facile encore d'y arriver en implantant normalement à la base d'une vanne une feuille de tôle recourbée vers l'intérieur en forme de col de cygne. Cette précaution simple est néanmoins bien rarement observée.

Les vannes inclinées sont fort utiles pour les roues hydrauliques qui prennent l'eau par en bas ; elles permettent de faire déboucher le courant très-près de la roue et il y a moins de force vive perdue.

On adopte toujours, pour calculer le débit, la formule

$$Q = mA\sqrt{2gh}$$

dans laquelle A est la section de l'orifice ouvert par la vanne, h la charge sur le centre de cet orifice et (m) un coefficient de correction obtenu par l'expérience

VALEURS DU COEFFICIENT DE DÉPENSE POUR UN ORIFICE DE 0m,20 DE LARGEUR DÉBOUCHANT A L'AIR LIBRE

1° Orifices pour lesquels la contraction est supprimée sur le côté inférieur

CHARGE SUR LE SOMMET DE L'ORIFICE	COEFFICIENT DE CORRECTION POUR UNE HAUTEUR D'ORIFICE DE					
	0m,20	0m,10	0m,05	0m,03	0m,02	0m,01
0.02	0.599	0.624	0.664	0.691	0.703	0.756
0.03	0.603	0.629	0.665	0.687	0.702	0.747
0.04	0.605	0.633	0.666	0.686	0.701	0.741
0.06	0.610	0.637	0.667	0.686	0.699	0.732
0.10	0.615	0.643	0.669	0.684	0.698	0.722
0.20	0.621	0.648	0.670	0.681	0.696	0.712
0.30	0.622	0.648	0.670	0.681	0.695	0.709
0.40	0.623	0.648	0.669	0.681	0.695	0.706
0.60	0.624	0.648	0.668	0.679	0.693	0.703
1.00	0.624	0.647	0.666	0.676	0.692	0.701
1.50	0.624	0.644	0.665	0.675	0.687	0.697
2.00	0.619	0.641	0.664	0.675	0.683	0.693
3.00	0.614	0.639	0.662	0.675	0.680	0.689

2° Orifices pour lesquels la contraction est supprimée sur les deux côtés verticaux

CHARGE SUR LE SOMMET	COEFFICIENT DE DÉPENSE POUR UNE HAUTEUR D'ORIFICE DE 0m,20	0m,05	0m,01	CHARGE SUR LE SOMMET	COEFFICIENT DE DÉPENSE POUR UNE HAUTEUR D'ORIFICE DE 0m,20	0m,05	0m,01
0.02	»	0.655	0.715	0.40	0.639	0.641	0.668
0.03	»	0.653	0.706	0.60	0.638	0.639	0.665
0.04	0.649	0.651	0.699	1.00	0.638	0.634	0.658
0.06	0.647	0.648	0.691	1.50	0 637	0.627	0.651
0.10	0.645	0.645	0.683	2.00	0.636	0.621	0.647
0 20	0.641	0.642	0.675	3.00	0.634	0.614	0.644
0.30	0.639	0.642	0.671				

3° Orifices pour lesquels la contraction est supprimée sur le côté inférieur et sur les deux côtés verticaux

CHARGE SUR LE SOMMET	COEFFICIENT DE DÉPENSE pour une hauteur d'orifice de 0m,20	0m,05	CHARGE SUR LE SOMMET	COEFFICIENT DE DÉPENSE pour une hauteur d'orifice de 0m,20	0m,05	CHARGE SUR LE SOMMET	COEFFICIENT DE DÉPENSE pour une hauteur d'orifice de 0m,20	0m,05
0.06	»	0.699	0.40	0.682	0.690	1.50	0.672	0.681
0.10	»	0.696	0.60	0.679	0.688	2.00	0.668	0.680
0.20	0.708	0.693	1.00	0.676	0.685	3.00	0.665	0.678
0.30	0.687	0.691						

On voit que, dans ce cas, on peut, sans erreur notable, adopter pour coefficient de la dépense le nombre 0,70.

Il s'applique à une vanne verticale.

Dans le cas où on a recours à une vanne inclinée à 1 de base pour 2 de hauteur, le coefficient de dépense s'élève à 0,74, et à 0,80 lorsqu'il s'agit d'une vanne inclinée à 1 de base pour 1 de hauteur.

Expériences de M. Bazin. — M. Bazin a procédé à quelques expériences sur l'écoulement par un orifice rectangulaire ménagé sous un barrage de 2 mètres de large. Cet orifice, dont la face inférieure et les deux faces latérales étaient formées par les parois mêmes du canal, avaient $0^m,105$ de hauteur pour les expériences 1 et 2, et $0^m,212$ pour les expériences 3 à 5. La contraction ne s'opérait que sur la face supérieure.

La section d'écoulement étant représentée par ω, on a mesuré directement le débit Q et on en a conclu la valeur du coefficient m :

NUMÉRO DE L'EXPÉRIENCE	HAUTEUR DE L'ORIFICE	Hauteur d'eau contre le barrage	Charge H sur le centre de l'orifice	Épaisseur de la lame d'eau à 0m,05 de la face d'aval du barrage	DÉBIT PAR SECONDE	Coefficient m de la formule : $Q = m.\omega.\sqrt{2gH}$
	mètres	mètres	mètres	mètres	litres	
1	0.105	0.330	0.278	0.070	307	0.626
2	»	0.785	0.733	0.074	515	0.647
3	0.212	0.506	0.400	0.150	721	0.607
4	»	0.798	0.692	0.143	927	0.593
5	»	0.946	0.840	0.144	1030	0.598

Exemple : Soit une vanne verticale de 0m,80 de large, laissant sous elle un orifice de 0m,20 de hauteur, avec une hauteur d'eau de 1m,50 au-dessus de sa base inférieure, quel est le débit ?



Fig. 20.

Il résulte de la formule

$$Q = m.A\sqrt{2gh}$$

D'après le tableau précédent, le coefficient de dépense est de 0,67 ; la section A est égale à

$$0,80 \times 0,20 = 0^{m.q},16 ;$$

la charge (h) sur le centre de l'orifice est 1m,60 et la vitesse correspondante, d'après la table de la page 34, est de 5m,60. Le débit est donc de

$$0,67 \times 0,16 \times 5,60 = 0^{m.c},600$$

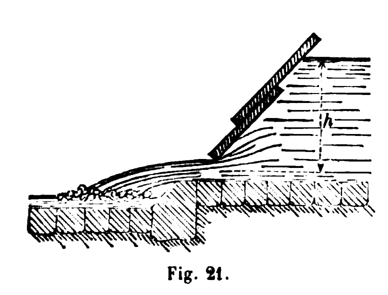


Fig. 21.

ou de 600 litres à la seconde.

S'il s'agit, au contraire, d'une vanne ayant les mêmes dimensions et la même charge d'eau que la précédente, mais inclinée à 1 de base pour 1 de hauteur, le coefficient de correction serait de 0,80 environ et la dépense atteindrait 716 litres ; cependant, le coefficient 0,80 nous paraît un peu élevé et nous pensons qu'il vaudrait mieux se limiter à 0,75.

3° AJUTAGE CYLINDRIQUE

L'étude de l'ajutage cylindrique nous amène à considérer pour la première fois la perte de force vive qui résulte d'un élargissement brusque dans la section d'écoulement d'une masse liquide.

Perte de force vive due à un élargissement brusque de section. — Nous avons vu en mécanique rationnelle que les chocs de deux corps solides étaient accompagnés d'une perte de force vive. Il en est de même avec les fluides; toutes les fois qu'un courant fluide éprouve une variation brusque de vitesse, on constate la perte d'une certaine quantité de force vive, dont nous allons apprécier la valeur.

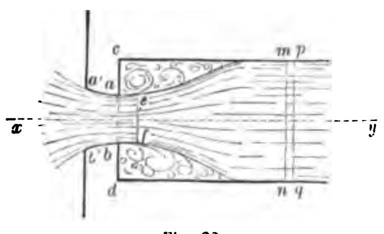


Fig. 22.

Soit une veine liquide ($a'b'ab$) s'échappant d'un orifice parfaitement évasé de telle sorte que tous les filets liquides passant en (ab) soient parallèles. A droite de la section (ab), le liquide occupe un tube de plus grande section, la veine s'étale en éventail pour occuper toute la surface et à une certaine distance de l'orifice (ab), dans la section (mn) par exemple, le mouvement par filets paral-

lèles s'est rétabli. L'air se confine d'abord dans les angles (*acm*), (*bdn*), mais il ne tarde pas à être entraîné et remplacé par un liquide qui tourbillonne lentement, qui engendre des remous, suivant l'expression usuelle; ce liquide forme comme une gaîne de la veine qui s'écoule et, vu son mouvement lent, il obéit sensiblement à la loi des pressions hydrostatiques. De même, les filets parallèles passant en (*ab*) et (*mn*) obéissent à la loi des pressions hydrostatiques comme nous l'avons expliqué en traitant du théorème de Bernoulli.

Ainsi, dans la section (*cd*) tout entière et dans la section *mn*, les pressions varient comme s'il s'agissait d'un liquide en repos; désignons par p la pression moyenne en *cd* et par P la pression moyenne en *mn*, par A la section *mn* et par a la section *ab*, par V la vitesse en *ab* et par v la vitesse en *mn*, par Q le débit à la seconde.

Lorsque le régime permanent s'est établi, le débit est le même en *ab* et en *mn*, d'où l'équation :

$$Q = aV = Av$$

Appliquons le théorème des projections des quantités de mouvement; à cet effet, nous admettrons que l'axe (*xy*) est horizontal, ce qui facilitera le calcul, mais le résultat serait le même dans le cas où l'appareil serait incliné.

Pendant un temps infiniment petit θ, le système *abmn* se déplace et vient en *efpq*; en vertu de la permanence, la partie commune *efmn* a même quantité de mouvement au commencement qu'à la fin du temps θ, et l'accroissement des projections des quantités de mouvement sur l'axe *xy* est égal à la différence des projections des quantités de mouvement des masses *mnpq* et *abef*.

En l'unité de temps, il passe dans chaque section un volume Q et par suite une masse $\left(\frac{\pi Q}{g}\right)$ de liquide; multipliant cette masse par la vitesse et le temps, on a pour la différence cherchée des quantités de mouvement :

$$\frac{\pi Q}{g}\theta(V-v)$$

Cherchons les projections des impulsions des forces pendant le même temps; les forces dues à la pesanteur sont normales à l'axe et ont des projections nulles; il ne reste que les deux pressions horizontales pA sur la section (*cd*) et PA sur la section (*mn*).

Égalant les projections des quantités de mouvement et les projections des impulsions des forces, il vient :

$$\frac{\pi Q}{g}.\theta(V-v) = A\theta(P-p)$$

Remplaçant Q par AV, on trouve :

$$\frac{V(V-v)}{g} = \frac{P}{\pi} - \frac{p}{\pi}$$

Qui peut s'écrire :

$$(1) \qquad \frac{V^2}{2g} - \frac{v^2}{2g} = \frac{P}{\pi} - \frac{p}{\pi} - \frac{(V-v)^2}{2g}$$

Le premier terme de cette équation est la différence des hauteurs dues aux

vitesses ; il est moindre que la différence des hauteurs dues aux pressions et l'excès $\frac{(V-v)^2}{2g}$ représente la perte de charge produite par l'élargissement du courant.

Nous venons donc de calculer le terme complémentaire qu'il faut ajouter à l'équation de Bernoulli lorsque interviennent les chocs et frottements; si ces résistances passives n'intervenaient pas, le dernier terme du second membre de l'équation (1) disparaîtrait, et la demi-variation des forces vives serait égale à la somme algébrique des travaux des forces P et p; à cause de l'élargissement brusque du courant, il y a une perte de force vive et par suite une perte de travail représentée par la quantité

$$\frac{\pi.Q}{g}\cdot\frac{(V-v)^2}{2g};$$

Cette perte croît comme le carré de la différence des vitesses d'écoulement avant et après le choc ou comme le carré de la différence des inverses des sections d'écoulement.

Application à l'ajutage cylindrique. — Connaissant la perte de force vive qui résulte d'un étranglement brusque de la section d'écoulement, nous allons pouvoir calculer la perte de charge qui se produit au passage d'un ajutage cylindrique.

Examinons ce qui se passe dans cet ajutage, le liquide afflue par l'orifice (cd) et la convergence se produit comme dans le cas de la mince paroi; la section contractée minima se trouve en ab; au delà, la veine s'élargit en perdant de sa vitesse et arrive à occuper toute la section de l'ajutage, de sorte qu'à sa sortie en (ef) elle est composée d'un assemblage de filets parallèles. A l'origine du mouvement, il reste de l'air confiné en mn autour de la partie contractée, mais cet air ne tarde pas à être entraîné et remplacé par un liquide tourbillonnant avec lenteur.

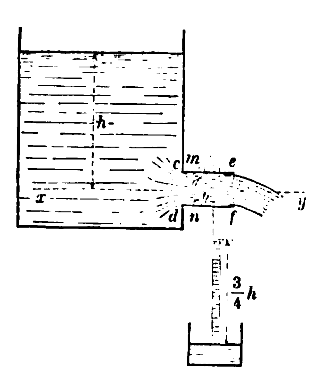


Fig. 23.

Désignons par h la charge sur le centre de l'ajutage, par A la section de l'ajutage et par ω la section contractée ab que nous savons être égale à 0,62 A ou, d'une manière générale, à (mA). Soit v' la vitesse d'écoulement en (ab) et v la vitesse à la sortie de l'ajutage, p la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du réservoir comme au pourtour (ef) de la veine et même à l'intérieur de cette section (ef) dont tous les filets se meuvent parallèlement, p' la pression qui règne dans le liquide confiné dans l'espace mn autour de la veine contractée.

Entre la surface du réservoir et la section ab, le théorème de Bernoulli est applicable, comme nous savons, sans aucune perte de charge, et en négligeant la vitesse à la surface du réservoir, en prenant comme axe horizontal l'axe xy de l'ajutage, il donne l'équation :

$$(1) \qquad h+\frac{p}{\pi}=\frac{p'}{\pi}+\frac{v'^2}{2g}$$

Le théorème de Bernoulli est encore applicable entre la section contractée ab

et la section ef, pourvu que l'on tienne compte de la perte de force vive due à l'élargissement brusque de section ; nous avons calculé tout à l'heure cette perte de force vive et il en résulte l'équation :

$$(2) \qquad \frac{p'}{\pi}+\frac{v'^2}{2g}=\frac{p}{\pi}+\frac{v^2}{2g}+\frac{(v'-v)^2}{2g}$$

Mais le débit Q est le même en ab qu'en ef, donc :

$$Q=v'.m.A=vA \quad \text{et} \quad v'=\frac{v}{m}$$

Ajoutant les équations (1) et (2) et substituant à v' sa valeur $\frac{v}{m}$ nous trouvons :

$$(3) \qquad v=\sqrt{2gh}\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{1}{m}-1\right)^2}}$$

Remplaçant le coefficient m par sa valeur connue 0,62, l'expression précédente devient :

$$v=0{,}85\sqrt{2gh}$$

et le débit Q est égal à

$$0{,}85.A\sqrt{2gh}.$$

Si l'on cherche expérimentalement la valeur du débit, on ne trouve que :

$$0{,}82.A.\sqrt{2gh}.$$

On voit que la différence entre la théorie et le résultat expérimental est bien faible, ce qui prouve que la théorie que nous avons faite ne doit pas être éloignée de la vérité.

Il convient de remarquer la différence qui existe entre l'écoulement par orifice en mince paroi et l'écoulement par ajutage cylindrique ; dans le premier cas, le coefficient de correction porte sur la section, dans le second il porte sur la vitesse.

Cherchons à déterminer la pression p' du liquide confiné autour de la veine ; l'équation (1) nous donne

$$\frac{p-p'}{\pi}=\frac{v'^2}{2g}-h=\frac{v^2}{2m^2g}-h=\frac{\overline{0{,}82}^2.2g.h}{2.m^2g}-h=0{,}75.h$$

Ainsi la pression en mn diffère de la pression atmosphérique d'une quantité représentée par les trois quarts de la hauteur h.

C'est ce que Venturi vérifia par l'expérience suivante, indiquée à la figure 23 : il mit la partie supérieure de l'espace mn en communication par un tube recourbé avec un vase plein d'eau ; au bout d'un certain temps, lorsque l'air fut entraîné hors de l'espace mn, l'eau s'éleva dans le tube et se fixa bientôt à une hauteur sensiblement égale aux trois quarts de h.

Il se produit donc autour de la partie contractée une sorte de succion ana-

logue à celle que nous avons constatée dans l'injecteur Giffard et dans le condenseur éjecteur Morton.

Représentation graphique de la perte de charge. — Au passage de l'ajutage cylindrique il se perd en frottements et tourbillons une certaine quantité de force vive, représentée par un abaissement du plan de charge.

En interprétant le théorème de Bernoulli, dans le cas d'un liquide parfait, nous avons vu qu'en superposant en chaque point du courant la hauteur représentative de la pression et la hauteur représentative de la vitesse, le sommet de la verticale ainsi obtenue se trouvait dans un plan horizontal fixe qu'on appelait le plan de charge.

Lorsque les deux hauteurs représentatives de la vitesse et de la pression, ajoutées l'une à l'autre, n'atteignent pas le plan de charge, la différence représente une perte de charge qui a été absorbée par les frottements et les remous.

La vitesse d'écoulement à l'extremité de l'ajutage cylindrique est donnée par l'équation :

$$v = 0{,}82\sqrt{2gh}\,;$$

cette équation élevée au carré devient :

$$\frac{v^2}{2g} = 0{,}67.h$$

La hauteur représentative de la vitesse n'est que les soixante-sept centièmes de la charge sur l'orifice; la perte de charge est donc d'environ un tiers de h, et le plan de charge s'abaisse par le passage dans l'ajutage cylindrique, comme le montre la figure 24 :

Fig. 24.

Si on place au-dessus de la surface libre du réservoir un tube piezométrique, l'eau s'y élèvera à une hauteur $\left(\frac{p}{\pi}\right)$ représentant la pression atmosphérique et l'horizontale uv indiquera le plan de charge; dans la section contractée de l'ajutage, le niveau piezométrique s'élèvera à une hauteur $\left(\frac{p'}{\pi}\right)$ représentant la pression et le reste de la verticale zv sera la hauteur représentative de la vitesse v'; à la sortie de l'ajutage, la pression est celle de l'atmosphère et le niveau piézométrique se trouvera à la hauteur $\left(\frac{p}{\pi}\right)$, ajoutant au-dessus la hauteur $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ représentant la vitesse, nous n'atteindrons pas l'horizontale uv et nous resterons au-dessous d'une quantité égale à $\left(\frac{h}{3}\right)$; le nouveau plan de charge sera xy ; dans l'intervalle de la section contractée à la sortie de l'orifice, la charge tombe de v en x et nous ne saurions dire par quelle ligne l'horizontale uv se raccorde avec l'horizontale xy.

Bien que cette étude de l'ajutage cylindrique offre pour la pratique peu d'intérêt, il est important de s'en rendre un compte exact parce qu'elle montre bien

l'influence qu'exercent les étranglements brusques sur les pertes de force vive et sur les pertes de charge qui correspondent à ces pertes de force vive. Nous retrouverons plus d'une fois des calculs analogues.

4° AJUTAGES CONIQUES

Les ajutages coniques ne présentent qu'un intérêt purement spéculatif, et nous nous contenterons de faire un exposé sommaire des phénomènes qui s'y passent.

On distingue les ajutages divergents, pour lesquels le sommet du cône est à l'intérieur du réservoir et les ajutages convergents pour lesquels, au contraire, le sommet du cône est à l'extérieur du réservoir.

Ajutages divergents. — Considérons un ajutage divergent dont l'embouchure *cdab* possède le profil parfaitement évasé, c'est-à-dire le profil que présente la veine liquide entre un orifice en mince paroi et la section contractée minima. De *ab* en *ef* il n'y a point de variations brusques de section, mais seulement des variations lentement progressives, les pertes de charge sont donc peu sensibles et la vitesse de sortie reste égale à la vitesse théorique, c'est-à-dire à $\sqrt{2gh}$; par suite le débit a pour expression le produit de la section *ef* ou A par $\sqrt{2gh}$,

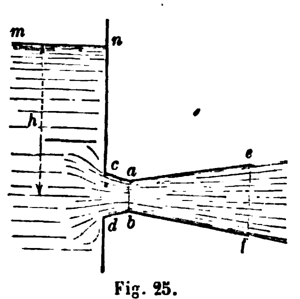


Fig. 25.

$$Q = A\sqrt{2gh}.$$

Ainsi, théoriquement, on pourrait avec cet ajutage obtenir un débit indéfini, pourvu que la section de sortie fût assez grande.

En réalité, il n'en est pas ainsi ; si la section A augmente indéfiniment, l'ajutage conservant une longueur limitée, les variations de section deviennent brusques et se traduisent par une perte de charge. D'autre part, quand la section *ef* dépasse une certaine valeur, le liquide n'adhère plus aux parois sur tout le périmètre et l'écoulement à gueule bée ne fonctionne plus. Enfin, il est une autre raison qui limite le débit : si l'on désigne par ω la section *ab*, par v' la vitesse en cette section et par v la vitesse à la sortie, par p' la pression en *ab* et par p la pression atmosphérique, on aura :

$$Q = v'\omega = v.A$$

et le théorème de Bernoulli, appliqué de *mn* en *ab* et de *ab* en *ef* donnera :

$$\frac{p}{\pi} + h = \frac{p'}{\pi} + \frac{v'^2}{2g} = \frac{p}{\pi} + \frac{v^2}{2g},$$

la pression p' ne peut être négative, théoriquement elle ne peut point dépasser zéro, car il ne saurait se produire de tension dans une masse liquide. Supposons donc qu'à la limite elle atteigne zéro, l'équation précédente deviendra :

$$\frac{v'^2}{2g} = \frac{p}{\pi} + \frac{v^2}{2g} \quad \text{ou :} \quad \frac{v^2 A^2}{2g\omega^2} - \frac{v^2}{2g} = \frac{p}{\pi} \quad \text{ou encore :} \quad h\left(\frac{A^2}{\omega^2} - 1\right) = 10^{m},33.$$

Étant données la section ω et la charge h, cette équation donnera la valeur maxima de A, et par suite le débit maximum.

En réalité, l'écoulement à gueule bée s'arrêtera bien avant que la pression p' soit devenue négative.

Voici les résultats qu'a trouvés Venturi opérant sous une charge constante de 0,88, avec une embouchure *cdab* dont le diamètre *cd* était de 0^{m},0406 et le diamètre *ab* 0^{m},0338 :

LONGUEUR DE L'AJUTAGE	ANGLE DE DIVERGENCE	COEFFICIENT DE LA DÉPENSE	LONGUEUR DE L'AJUTAGE	ANGLE DE DIVERGENCE	COEFFICIENT DE LA DÉPENSE
mètres	degrés		mètres	degrés	
0.111	3.30′	0.93	0.059	5.44′	0.82
0.334	4.38′	1.21	0.264	10.16′	0.91
0.460	4.38′	1.27	0.045	10.16′	0.91
0.176	5.44′	1.02	0.045	14.14′	0.61

Ces nombres vérifient bien ce que nous disions plus haut : dès que la divergence est trop rapide, la dépense diminue, le coefficient tombe même au-dessous de l'unité et finit par atteindre la valeur relative à l'écoulement en mince paroi.

Fig. 26.

Ajutages convergents. — Dans les ajutages convergents, deux effets interviennent : 1° la vitesse théorique est réduite par suite de la contraction suivie d'une dilatation que la veine éprouve à sa sortie de la section *ab* ; 2° la section d'écoulement *cd* à l'extrémité de l'ajutage est réduite aussi par la convergence des filets liquides qui ne deviennent parallèles que dans la section *ef* à laquelle correspond le minimum de contraction.

La vitesse v est donc égale à. . . . . . . $n\sqrt{2gh}$,

La section d'écoulement. . . . . mA

Et le débit devient. . . . . $Q = m.n.A\sqrt{2gh}$.

Les deux coefficients dépendent de la conicité de l'ajutage ; si l'angle au sommet du cône est nul, on se trouve dans le cas de l'ajutage cylindrique, le coefficient n est égal à 0,82 et le coefficient m à l'unité ; si l'angle au sommet du cône est tel que l'ajutage corresponde au profil de parfait évasement, les coefficients m et n sont égaux à l'unité ; si l'angle au sommet du cône est de 180°, l'orifice est en mince paroi, le coefficient n est égal à l'unité et le coefficient m à 0,62.

On doit à M. Castel une série d'expériences sur les ajutages coniques divergents ; il se servait d'ajutages dont le diamètre à l'extrémité était de 0^{m},0155, dont la longueur était égale à 2,6 fois ce diamètre, avec des charges variant de 0^{m},21 à 3^{m},03, ce qui prouve que les coefficients sont indépendants des charges.

En mesurant les débits, il appréciait en bloc la valeur du produit mn. En relevant la parabole formée par la veine à sa sortie de l'ajutage, ainsi que nous l'avons fait en vérifiant le théorème de Torricelli, il déterminait le coefficient de réduction n de la vitesse ; en effet, l'équation de la parabole d'écoulement s'ob-

tient en éliminant t entre les deux expressions

$$x = vt \qquad y = \frac{gt^2}{2},$$

ce qui donne :

$$y = \frac{gx^2}{2v^2}.$$

Connaissant x et y, cette équation donnera v; de cette valeur de v comparée à sa valeur théorique $2gh$, on déduira le coefficient n. Castel a pu par ce procédé dresser le tableau suivant :

ANGLE DE CONVERGENCE	COEFFICIENT mn DE LA DÉPENSE	COEFFICIENT n DE LA VITESSE	ANGLE DE CONVERGENCE	COEFFICIENT mn DE LA DÉPENSE	COEFFICIENT n DE LA VITESSE
degrés			degrés		
0.0′	0.830	0.830	13.24′	0.946	0.962
1.36′	0.866	0.866	14.28′	0.941	0.966
3.10′	0.895	0.894	16.36′	0.938	0.971
4.10′	0.912	0.910	19.28′	0.924	0.970
5.26′	0.924	0.920	21.00′	0.918	0.971
7.52′	0.929	0.931	23.00′	0.913	0.974
8.58′	0.934	0.942	29.58′	0.896	0.975
10.20′	0.938	0.950	40.20′	0.869	0.980
12.4′	0.942	0.955	48.50′	0.847	0.984

ÉTUDE DE DIVERS SYSTÈMES D'ÉCOULEMENT.

Pour terminer ce chapitre, nous étudierons différents systèmes d'écoulement qu'on rencontre quelquefois dans la pratique.

Réservoirs communiquants. — Considérons deux réservoirs à niveau constant mn, pq ; ces deux niveaux sont à une distance verticale h l'un de l'autre, et les réservoirs communiquent par l'orifice ab dont la section est très-petite en comparaison de la surface des réservoirs. Désignons par p et par p' les pressions que l'atmosphère exerce au-dessus des surfaces mn, pq.

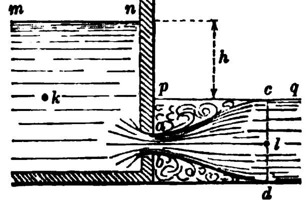


Fig. 27.

La section du réservoir pq étant, comme nous l'avons dit, incomparablement plus grande que la section d'écoulement ab, la surface pq reste partout horizontale et on peut admettre que, dans la section cd située à une certaine distance de l'orifice, le liquide est sensiblement en repos. Appliquant le théorème de Bernoulli de (ab) en cd, nous voyons que le niveau piézométrique est le même dans ces deux sections et que la hauteur représentative de la vitesse d'écoulement disparaît lorsqu'on passe à la section cd ; il y a donc une perte de charge égale à $\frac{v^2}{2g}$.

Évaluons d'autre part cette perte de charge ; soit une molécule qui passe du point k du premier réservoir au point l du second et qui, dans ces deux positions, se trouve assez éloignée de l'orifice ab pour que sa vitesse soit sensiblement nulle ; appliquons-lui le théorème de Bernouilli ; la perte de charge qu'elle subit sera égale à la différence des niveaux piézométriques en k et l, c'est-à-dire à :

$$h+\frac{p}{\pi}-\frac{p'}{\pi}.$$

Égalant les deux valeurs trouvées pour la perte de charge, nous obtenons :

$$v=\sqrt{2g\left(h+\frac{p}{\pi}-\frac{p'}{\pi}\right)},$$

et tout simplement, $v=\sqrt{2gh}$, lorsque les deux réservoirs débouchent librement à l'air.

Barrage à poutrelles. — Lorsqu'on veut barrer un cours d'eau, on a quelquefois recours à un barrage à poutrelles, sorte de muraille transversale formée de madriers équarris, superposés et engagés à chaque bout dans une rainure qu'on a ménagée dans un massif de maçonnerie. Supposons qu'il s'agisse d'exhausser le barrage et de faire descendre la poutrelle P jusqu'au contact des autres poutrelles déjà posées.

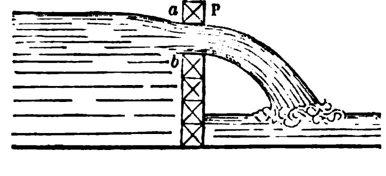


Fig. 28.

On la laisse tomber dans la rainure, de manière qu'elle flotte à la surface du courant ; sous elle passe une tranche d'eau semblable à celle qui s'échappe d'un ajutage ; par un effet identique à celui que nous avons constaté en traitant de l'ajutage cylindrique, il existe une certaine contraction du courant liquide au moment où il arrive sous la poutrelle P, la pression se trouve diminuée sous cette poutrelle, tandis que la pression atmosphérique règne toujours au-dessus. Il y a donc excès de pression de haut en bas, et la poutrelle descend d'elle-même à sa place.

Le bateau-porte et les vannes, maintenant automatiquement un niveau constant à l'amont, se rapprochent des systèmes précédents ; nous les retrouverons en traitant de la question des barrages.

CHAPITRE III

ÉCOULEMENT DE L'EAU PAR DES ORIFICES A PÉRIMÈTRE NON FERMÉ. DÉVERSOIRS. — CANAUX

DÉVERSOIRS

Les déversoirs sont des orifices ouverts à leur partie supérieure; les déversoirs sont généralement rectangulaires. Étant donnée une vanne arrêtant un cours d'eau, si on lève cette vanne, l'écoulement se fait par dessous et on a un orifice de fond; si au contraire on l'abaisse, l'eau passe dessus, en tranche plus ou moins épaisse, et l'on a un orifice de superficie, un écoulement par déversoir.

Le déversoir est un des ouvrages régulateurs des usines; c'est une échancrure rectangulaire ménagée dans un barrage en maçonnerie; la base de cette échancrure, ou seuil du déversoir, est placée au niveau légal de la retenue; la largeur ou dimension horizontale de l'orifice est égale à la largeur de la rivière, de sorte que, s'il arrive une crue, le déversoir peut livrer passage à toute la tranche d'eau qui se trouve au-dessus du niveau légal. Les côtés latéraux du déversoir s'appellent les joues.

1° DÉVERSOIRS EN MINCE PAROI.

Considérons un cours d'eau qui s'épanche au-dessus d'un barrage; à une certaine distance du barrage, le niveau de l'eau *mn* est horizontal, mais en s'approchant du déversoir, on reconnaît que la surface se déprime, la chute de l'eau commence, et bien que le seuil (*b*) du déversoir soit à la profondeur *h* au-dessous du niveau *mn*, la hauteur de la lame d'eau qui passe sur ce seuil est inférieure à *h* et égale à *x*.

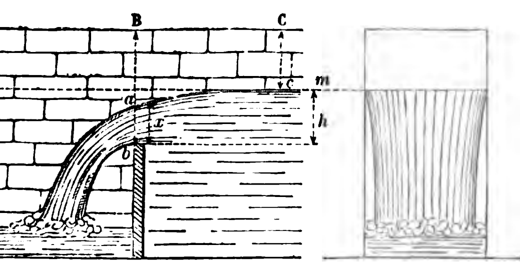


Fig. 22.

La charge sur le seuil a donc pour valeur (*h*) et la charge en *a* a pour valeur $(h-x)$; si nous prenons le centre de l'orifice et que nous en considérions la

vitesse comme vitesse moyenne du courant, elle sera donnée par l'équation :

$$v=\sqrt{2g\left(h-\frac{x}{2}\right)}.$$

La surface d'écoulement est égale à L.x, L étant la largeur du déversoir ; tenant compte du coefficient de contraction (m), le débit Q s'obtiendra par la formule :

$$Q=m\text{L}.x\sqrt{2g\left(h-\frac{x}{2}\right)}.$$

Le rapport de x à h est variable entre l'unité et 0,72 ; il est donc en moyenne égal à 0,86 ; si en outre, nous adoptons pour m la valeur trouvée dans le cas des orifices en mince paroi, nous arriverons à :

$$Q=0.403.\text{L}.h\sqrt{2gh}.$$

Au lieu d'établir la formule de cette manière approchée, il vaut mieux adopter tout d'abord la formule empirique :

$$Q=\alpha.\text{L}.h.\sqrt{2gh},$$

et établir le coefficient α par l'expérience.

C'est ce qu'ont fait MM. Poncelet et Lesbros.

Voici un tableau des expériences auxquelles ils ont procédé avec un déversoir de 0^{m},20 de large, ménagé en mince paroi.

CHARGE h SUR LA BASE DE L'ORIFICE	DÉBIT EN LITRES PAR SECONDE	COEFFICIENT α DE CORRECTION	CHARGE h SUR LA BASE DE L'ORIFICE	DÉBIT EN LITRES PAR SECONDE	COEFFICIENT α DE CORRECTION
mètres	litres		mètres	litres	
0.0235	1.325	0.415	0.1029	11.528	0.394
0.0446	3.382	0.405	0.1631	22.929	0.393
0.0605	5.277	0.400	0.2079	32.643	0.389

Cette première série d'expériences a été complétée ultérieurement et l'on a trouvé les nombres suivants :

CHARGE h SUR LE SEUIL DU DÉVERSOIR	COEFFICIENT α DE CORRECTION		
	MINCE PAROI	CONTRACTION SUPPRIMÉE SUR LE SEUIL	CONTRACTION SUPPRIMÉE SUR LE SEUIL ET LES JOUES
mètres			
0.20	0.390	0.405	0.432
0.22	0.386	0.405	0.430
0.25	0.379	0.404	0.428
0.30	0.371	0.403	0.424

On voit que le coefficient de correction va en diminuant quand la charge augmente ; lorsque la contraction est supprimée sur le fond, ce qui est à peu près le

cas ordinaire, le coefficient de correction est sensiblement égal à 0,40 et l'on peut adopter ce nombre, tant que l'on reste entre les limites des expériences.

La formule du débit devient alors :

$$Q = 0{,}40.L.h\sqrt{2gh} = 1{,}77.L.h.\sqrt{h}.$$

D'après les expériences de Castel et d'Aubuisson, le coefficient précédent est trop faible et on doit prendre :

$$Q = 1{,}96.L.h.\sqrt{h}.$$

La seule chose à reprocher aux expériences de Poncelet, c'est qu'elles s'appliquent à des déversoirs n'ayant que $0^m{,}20$ de large ; en réalité, on peut sans grand danger étendre les formules à une largeur quelconque, car on ne laisse jamais passer sur un déversoir une grande hauteur d'eau ; c'est surtout la contraction sur le seuil qui a de l'influence, et on peut admettre qu'elle est indépendante de la largeur. Cependant, l'influence de la contraction latérale est plus grande avec une faible largeur qu'avec une grande.

Exemple : Lorsqu'on procède à un jaugeage par déversoir, il ne faut pas oublier que la hauteur qui entre dans la formule n'est pas celle de la tranche d'eau qui passe sur le déversoir, mais la différence de niveau entre le seuil et la surface du courant, prise à une certaine distance du déversoir, là où elle conserve à peu près son horizontalité.

Voici comment on trouve cette différence de niveau, figure 28 : la droite BC représentant l'arête de la berge, on prend avec une règle la profondeur B*b* ; de même, on prend à une certaine distance la hauteur C*c* ; on fait le nivellement des points B et C ; supposons que B soit à $0^m{,}10$ au-dessous de C, la chute *h* sera égale à :

$$Bb + 0{,}10 - Cc.$$

Généralement, aux abords du déversoir, la berge est sensiblement horizontale, et on peut se passer de nivellement. On arrive de la sorte à des résultats suffisamment exacts pour les besoins de la pratique.

Soit un déversoir de 3 mètres de large, avec une charge de $0^m{,}15$; son débit sera de :

$$0{,}40.3.0{,}15\sqrt{2g.0{,}15} = 0{,}40.3.0{,}15.1{,}715 = 0{,}308,$$

ou de 308 litres à la seconde.

Formule du général Morin. — D'après le général Morin, le coefficient du débit serait 0,44, au lieu de 0,40.

« Lorsque la largeur du déversoir est égale à celle du canal, dit-il, ce qui s'applique à beaucoup de cas, tels que les vannes des roues hydrauliques, les barrages des rivières, et que le déversoir est vertical, mince et à vive arête, les résultats de l'expérience sont assez exactement représentés par la formule :

$$Q = 0{,}443.L.h.\sqrt{2gh}.$$

Toutefois, d'après d'Aubuisson, cette formule ne doit être employée que quand la charge n'excède pas le tiers de la hauteur du barrage au-dessus du fond du réservoir, parce que, quand cette proportion est dépassée, la vitesse moyenne de l'eau dans le canal devient assez grande pour exercer une influence

sensible et augmenter la dépense. Au surplus, cette proportion n'est jamais et ne doit pas être dépassée dans les usines, pour les vannes des roues hydrauliques. »

Expériences de M. Bazin. — M. Bazin, au cours de ses expériences sur les canaux, a eu l'occasion de procéder à quelques jaugeages par déversoir.

Première série d'expériences avec un déversoir de $1^m,50$ *de large.* — « La crête de ce déversoir, formé par des poutrelles de $0^m,08$ d'équarrissage, est à $1^m,10$ au-dessus du fond du canal en maçonnerie qui le précède, et qui a lui-même 3 mètres de largeur. Le déversoir, occupant ainsi la moitié de la largeur du canal, la contraction latérale, sans être complétement nulle, comme dans les expériences de M. Boileau, est cependant loin d'être aussi grande que dans les expériences de MM. Poncelet et Lesbros. »

Voici les résultats des expériences :

CHARGE h DU DÉVERSOIR	DÉBIT PAR SECONDE	COEFFICIENT α
mètres	litres	
0.229	304	0.417
0.353	658	0.472
0.448	940	0.472
0.548	1296	0.481

« Les trois dernières valeurs du coefficient sont peu différentes, mais la première est notablement inférieure. Cette anomalie apparente tient à un phénomène remarquable signalé par plusieurs expérimentateurs : l'air enfermé sous la nappe, en raison du prolongement des parois latérales du déversoir, se trouvant à une pression inférieure à celle de l'atmosphère, avec laquelle il ne communique plus, l'eau d'aval s'élève, par suite de ce défaut de pression, sous la nappe, d'autant plus que la charge est plus grande ; à partir d'une certaine charge, elle atteint la crête du déversoir, et la nappe se trouve alors noyée en dessous, c'est-à-dire complètement adhérente à la face d'aval du barrage. Ce phénomène exerce une grande influence sur le débit : M. Boileau donne en effet, pour un déversoir à peu près semblable à celui que nous avons considéré, les coefficients suivants :

CHARGE DU DÉVERSOIR	COEFFICIENT
mètres	
0.12	0.394 nappe libre ou détachée du barrage.
0.14	0.413 — —
0.16	0.446 nappe noyée en dessous.
0.18	0.458 — —
0.20	0.467 — —

« On voit par ces chifres que le coefficient augmente subitement au moment où la nappe est noyée en dessous. »

D'autres opérations, exécutées par M. Bazin, sur un déversoir analogue au précédent, ont donné les résultats ci-après :

CHARGE SUR LE DÉVERSOIR	DÉBIT PAR SECONDE	COEFFICIENT
mètres	litres	
0.216	297	0.445
0.344	610	0.455
0.444	890	0.453
0.508	1132	0.471

Les coefficients de la dernière colonne diffèrent peu les uns des autres, parce que le déversoir ne présentait pas le phénomène des nappes noyées au-dessous.

Il est utile de reproduire encore quelques résultats des expériences de M. Bazin sur les déversoirs :

Dans un canal en maçonnerie de 2 mètres de large, on a établi un barrage transversal ayant $0^m,606$ de hauteur pour les expériences n° 1 à n° 6, et $0^m,404$, pour les expériences 7 à 9. Le débit s'obtient par la formule :

$$Q = m.L.h\sqrt{2gh}.$$

La charge h est l'élément le plus difficile à déterminer, on l'a obtenue par un nivellement entre la crête du déversoir et la surface de l'eau prise à 20 mètres du déversoir. En mesurant directement le débit Q, on en conclut la valeur du coefficient m.

NUMÉRO DE L'EXPÉRIENCE	DÉBIT Q PAR SECONDE	ÉPAISSEUR DE LA LAME D'EAU	CHARGE DU DÉVERSOIR	VALEUR DU COEFFICIENT m
	litres	mètres	mètres	
1	103	0.066	0.091	0.424
2	209	0.110	0.143	0.436
3	317	0.142	0.189	0.436
4	424	0.168	0.218	0.470
5	531	0.190	0.239	0.513
6	637	0.213	0.270	0.513
7	721	0.240	0.308	0.476
8	824	0.271	0.325	0.502
9	1030	0.316	0.386	0.485

Dans les quatre premières expériences, l'eau s'élevait bien à l'aval du barrage au-dessous de la veine, mais n'arrivait pas jusqu'à celle-ci ; dans les expériences 5 et 6, l'eau d'aval s'élevait fréquemment jusqu'à la crête du barrage, la nappe était instable, et son épaisseur, très-difficile à mesurer. Dans les trois dernières expériences, la nappe était complétement noyée au-dessous.

« Le phénomène signalé plus haut s'est reproduit dans ces expériences. L'air enfermé sous la nappe se trouvait à une pression inférieure à celle de l'atmosphère, et l'eau d'aval s'élevait contre le déversoir à une hauteur croissante avec la charge du déversoir. »

Les nombres trouvés par M. Bazin nous apprennent que l'on peut adopter pour valeur du coefficient de correction m :

1° 0,42 à 0,47 pour les veines qui ne sont pas noyées par-dessous, lorsque la charge varie de $0^m,10$ à $0^m,50$;

2° 0,47 à 0,50 pour les veines noyées par-dessous.

Débit des déversoirs obliques. — M. Bazin a étudié l'influence de l'obliquité des déversoirs ; à cet effet, il a établi dans le canal de 2 mètres de large des barrages occupant 4 mètres, 3 mètres, et 2^m,50 de large.

Avec la largeur de 4 mètres, le coefficient de correction a varié de 0,386 à 0,443 lorsque la charge variait de 0^m,06 à 0^m,28 ; les nappes sont toujours restées libres et non reliées à l'eau d'aval ;

Avec le barrage oblique de 3 mètres, le coefficient a varié de 0,425 à 0,463, lorsque la charge a varié de 0^m,068 à 0^m,216, la nappe demeurant libre ; la nappe variant de 0^m,25 à 0^m,30 s'est trouvée noyée en dessous, et le coefficient de correction a varié de 0,49 à 0,47.

Avec le barrage oblique de 2^m,50, le coefficient a varié de 0,415 à 0,490 ; lorsque la charge a varié de 0^m,078 à 0^m,235, la nappe demeurant libre ; lorsque la charge a atteint 0^m,29, la nappe a été noyée par-dessous et le coefficient s'est élevé à 0,49.

« La crête des barrages, dit M. Bazin, avait été dressée avec un très-grand soin. Ordinairement l'épaisseur de la lame d'eau sur le barrage va en diminuant, depuis l'angle obtus jusqu'à l'angle aigu, sauf pour le barrage de 4 mètres, où la plus grande épaisseur paraît être vers le milieu de la longueur totale. »

« Le calcul du coefficient m a été fait en donnant à L la valeur de 4 mètres pour le premier barrage, 3 mètres pour le second et 2^m,50 pour le troisième. Ce coefficient diminue un peu à mesure que l'obliquité du barrage augmente, ainsi que l'on pouvait s'y attendre. Il faut remarquer en outre que les parois du canal étant continuées en aval du déversoir, l'écoulement se trouvait un peu gêné vers l'une de ses extrémités, ce qui tend à diminuer m. Toutefois, cette circonstance n'a pu avoir une influence sensible. »

2° DÉVERSOIRS SUIVIS D'UN COURSIER.

Lorsque les déversoirs sont suivis d'un coursier d'une certaine longueur, analogue à celui de la figure 30, horizontal ou peu incliné, la nappe qui s'écoule traverse la section mn sous forme d'un faisceau de filets parallèles, et la pression varie à l'intérieur de cette section suivant la loi hydrostatique.

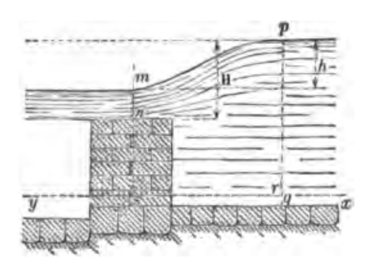


Fig. 30.

D'un autre côté, faisons une section pq dans le canal en amont ; généralement la section pq est assez grande par rapport à mn, pour que nous puissions considérer la vitesse comme nulle en un point quelconque de cette section (pq).

Nous pouvons donc appliquer le théorème de Bernouilli entre les deux sections considérées, et il nous donne, en prenant le plan horizontal xy comme plan de comparaison, et en désignant par p_0 la pression atmosphérique

$$rp+\frac{p_0}{\pi}=sm+\frac{p_0}{\pi}+\frac{v^2}{2g}; \quad \text{ou :} \quad \frac{v^2}{2g}=rp-sm=h, \quad v=\sqrt{2hg}.$$

La section d'écoulement est égale à L (H — h) et le débit à :

$$(1) \qquad Q = L(H-h)\sqrt{2gh}.$$

Dans cette expression du débit se trouve une inconnue h ; il faut donc trouver une autre équation entre cette inconnue et le débit.

On admet, ce qui paraît naturel, sans toutefois être démontré, que la quantité h prend une valeur telle que le débit soit maximum ; à ce moment, la dérivée de Q par rapport à h, doit être nulle. D'après l'équation (1) cette dérivée est égale à :

$$(H-h).\frac{g}{\sqrt{2gh}} - \sqrt{2gh};$$

égalée à zéro, elle donne :

$$h = \frac{H}{3}.$$

Et, en introduisant cette valeur dans l'équation (1), on trouve :

$$(2) \qquad Q = 0{,}385.L.H\sqrt{2gH}.$$

M. Lesbros a cherché à vérifier par l'expérience cette formule théorique ; on lui doit les résultats suivants, obtenus avec un orifice rectangulaire de 0m,20 de largeur,

1° Lorsque la contraction est complète sur le seuil et sur les côtés verticaux de l'orifice :

Pour une valeur de H de	0m,02	le coefficient m	de correction	est de	0,20
—	0m,07	—	—	atteint	0,30
Au delà, jusqu'à. . . .	0m,30	—	—	varie de	0,30 à 0,32

2° Lorsque la contraction est supprimée sur le seuil et maintenue sur les côtés verticaux de l'orifice :

Pour une valeur de H de	0m,02	le coefficient m de correction est de	0,20
—	0m,10	—	0,30
—	0m,20	—	0,32
—	0m,30	—	0,33

Dans d'autres expériences, on a trouvé pour la valeur du coefficient 0,33 à 0,35.

Lorsque, dans la pratique, on aura à calculer le débit d'un déversoir de ce genre, on pourra adopter la formule :

$$Q = 0{,}35.L.H.\sqrt{2gH}.$$

Ainsi, le débit d'un déversoir de 2 mètres de large, dont le seuil est à 0m,20 au-dessous du niveau de l'eau prise à une certaine distance à l'amont, est égal à :

$$0{,}35.2.0{,}20.1{,}98 = 277 \text{ litres}.$$

Dans le cas où la vitesse de l'eau à l'amont du déversoir serait sensible et

comparable à celle qui se produit au passage même du déversoir, il faudrait en tenir compte, parce que les formules n'ont pas été établies pour des cas analogues.

CANAUX

L'étude de l'écoulement dans les canaux naturels ou artificiels est des plus importantes; il serait précieux d'obtenir des formules exactes correspondant à tous les cas de la pratique. Malheureusement, il n'en est pas ainsi et il faut se contenter de formules empiriques, dans lesquelles on ne peut avoir confiance que pour des circonstances déterminées. Du reste, le problème pratique se présente sous tant d'aspects divers, qu'il ne peut donner lieu à une théorie générale embrassant tous les cas.

Etant donné un canal de section régulière, il peut s'y établir un courant d'un régime uniforme ou d'un régime varié.

Lorsque le régime est uniforme, on arrive assez facilement par l'expérience à établir les lois de l'écoulement, et c'est ce qui fera le sujet de la première partie de notre étude.

Lorsque le régime est varié, c'est-à-dire lorsque les conditions de l'écoulement changent d'une section à l'autre, le problème se complique, et jusqu'à présent, il n'a pas été résolu d'une manière satisfaisante, bien qu'il ait donné lieu à de beaux travaux mathématiques. Le mouvement varié dans les canaux, formera donc la seconde partie de notre étude.

PREMIÈRE PARTIE

RÉGIME UNIFORME DES CANAUX

Résistances qui retardent le mouvement de l'eau dans les canaux. — Le mouvement des liquides, dit Dupuit, donne lieu à deux espèces de résistances bien distinctes : 1° celle que les molécules éprouvent à changer de position les unes par rapport aux autres, qu'on appelle cohésion ; 2° celle qu'elles éprouvent à se détacher des surfaces solides avec lesquelles elles sont en contact, qu'on appelle adhérence. Si ces deux résistances étaient bien connues, les principes de mécanique et les procédés d'analyse ordinaire suffiraient pour résoudre d'une manière complète toutes les questions d'hydrodynamique.

L'existence de ces deux résistances et quelques-unes de leurs propriétés nous sont révélées par un phénomène que nous avons tous les jours sous les yeux ; la vitesse des cours d'eau naturels, quelle que soit leur pente, est sensiblement uniforme et n'est jamais en rapport par conséquent avec la hauteur de la chute, depuis la source jusqu'au point considéré. Il faut donc nécessairement que dans ce mouvement se développent des forces retardatrices qui croissent avec la vitesse de manière à faire équilibre à la force accélératrice de la pesanteur.

Lorsque des solides sont placés sur un plan incliné de longueur indéfinie et de pente uniforme, le mouvement qui se produit, quand cette pente dépasse un certain angle, est toujours accéléré, parce que le frottement est indépendant de la vitesse. L'adhérence et la cohésion des liquides présentent donc, quant à la vitesse, une propriété essentiellement différente de celle du frottement des solides sur les solides. Nous disons l'adhérence et la cohésion parce qu'il suffirait que l'intensité d'une de ces deux résistances fût indépendante de la vitesse pour que le mouvement devînt accéléré dans tout ou partie de la masse liquide.

Une autre propriété des forces retardatrices que nous considérons, c'est qu'elles sont indépendantes de la pression. Il est facile, surtout dans les tuyaux, de faire varier la pression, sous laquelle s'opère l'écoulement, dans des limites trop étendues pour qu'il puisse rester le moindre doute à l'égard de cette propriété. Si, comme pour les solides, la résistance était proportionnelle à la pression, il y aurait de telles variations dans le débit d'un tuyau, suivant que la pression serait plus ou moins grande, qu'elles ne pourraient échapper aux expériences les plus grossières.

Ainsi, les résistances dues à l'adhérence et à la cohésion des molécules croissent avec leur vitesse relative, et sont indépendantes de la pression à laquelle elles sont soumises.

FORMULE DE DE PRONY.

L'adhérence et la cohésion réunies étant essentiellement dépendantes de la vitesse, désignons par U la vitesse moyenne des filets liquides qui traversent une section quelconque du canal, telle que *ab*.

Le régime est, avons-nous dit, permanent et uniforme, ce qui veut dire qu'en toute section la surface d'écoulement est la même et que les vitesses sont aussi les mêmes aux points correspondants de deux sections quelconques; la pente est aussi constante sur toute l'étendue du canal. C'est ce que représente la figure 31; la ligne de superficie *aa'* est parallèle à la ligne de fond *bb'*.

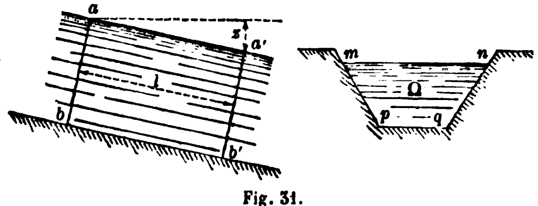


Fig. 31.

La lettre Ω désigne la superficie de la section mouillée *mnpq*;

χ désigne le périmètre *mpqn* de cette section; dans ce périmètre n'entre pas l'horizontale supérieure *mn* qui est en contact avec l'atmosphère;

La lettre z désigne l'abaissement du plafond du canal sur la longueur l; le rapport $\left(\frac{z}{l}\right)$, qu'on désigne par la lettre I, représente donc la pente par mètre de la ligne de fond *bb'* et de la ligne de superficie *aa'*, c'est ce qu'on appelle la pente du canal.

Pour terminer avec les notations, nous dirons que le rapport $\left(\frac{\Omega}{\chi}\right)$ de la section d'écoulement au périmètre mouillé est désigné d'ordinaire par la lettre R et s'appelle le rayon moyen.

Ceci posé, la force retardatrice due à l'ensemble de la cohésion et de l'adhérence est représentée, pour l'unité de surface des parois mouillées du canal, par l'expression :

$$f(U).$$

Cette force est, comme toujours, exprimée en kilogrammes; si nous la divisons par la densité π du liquide, la force sera représentée par le volume d'une certaine colonne d'eau ; la densité étant constante, la force retardatrice n'en restera pas moins sous la forme :

$$F(U).$$

Entre les sections ab et $a'b'$, la surface mouillée du canal est (χl) et, comme la force retardatrice est proportionnelle à cette surface, la force retardatrice totale est égale à :

$$\chi l F(U),$$

et elle est exprimée en volume d'une certaine colonne d'eau.

Supposons maintenant qu'il y ait absence complète de frottement et de cohésion, la pesanteur déterminerait en chaque point de la section $a'b'$ une charge z due au poids du liquide compris entre $a'b'$ et ab, et il en résulterait pour la section entière Ω, une charge représentée par le volume $z\Omega$ d'une colonne d'eau.

Le mouvement étant uniforme, c'est que cette charge tout entière a été absorbée par les frottements, et n'a en aucune manière servi à accélérer le mouvement du liquide ; nous avons donc évalué d'une part, la perte de charge ; d'autre part, les frottements qui lui correspondent. Nous n'avons pour obtenir l'équation du mouvement, qu'à égaler ces deux quantités, ce qui nous donne :

$$z.\Omega = \chi.l.F(U)$$

ou bien,

$$\frac{\Omega}{\chi}\cdot\frac{z}{l} = F(U),$$

ou tout simplement :

$$(1). \quad RI = F(U).$$

Détermination de la fonction F. — Cette formule ne nous donne aucun résultat pratique, puisque la fonction F est indéterminée.

Pour la déterminer, on a recours à la méthode empirique que nous avons exposée plus haut à la page 23.

On choisit une forme pour cette fonction, forme dans laquelle subsistent n coefficients indéterminés; à l'aide de n expériences, on a calculé n valeurs de R, de U et de I qui, substituées successivement dans l'équation (1), fournissent n équations, d'où on tire la valeur des n coefficients cherchés.

La formule est alors établie ; on y substitue les valeurs trouvées dans d'autres expériences pour le rayon moyen, la vitesse moyenne et la pente du canal, et on voit si les deux membres de l'équation restent toujours numériquement égaux ; lorsqu'il en est ainsi, la formule empirique est bonne et on la garde ; sinon, elle est mauvaise, alors on augmente le nombre des termes, ou on choisit une autre formule, jusqu'à ce qu'on en obtienne une qui soit vérifiée par tous les résultats expérimentaux.

De Prony avait mis l'équation (1) sous la forme empirique :

$$(2) \quad RI = aU + bU^2;$$

en se servant de trente expériences de Dubuat et d'une expérience de Chézy, il a trouvé pour les coefficients a et b les valeurs :

$$\begin{cases} a=0{,}000044, \\ b=0{,}000309. \end{cases}$$

Quelques années plus tard, vers 1814, Eytelwein, prenant comme point de départ les expériences précédentes et cinquante-cinq expériences nouvelles, proposa pour les coefficients de la formule (2) les valeurs :

$$\begin{cases} a=0{,}000024, \\ b=0{,}000366. \end{cases}$$

En 1851, M. de Saint-Venant donna la formule suivante, qui a l'avantage d'être calculable par logarithmes :

$$(2) \qquad RI=0{,}000401\,U^{\frac{21}{11}};$$

Chézy et les ingénieurs italiens se sont servis de la formule plus simple :

$$(3) \qquad RI=0{,}0004.U^2 \quad \text{ou} \quad U=50\sqrt{RI}.$$

« Toutes ces formules, dit M. Bazin, sont presque équivalentes dans les applications pratiques ; ce ne sont, à proprement parler, que des remaniements différents des mêmes données expérimentales ; car la masse des faits d'observation dont la théorie peut disposer, n'avait pas sensiblement augmenté depuis le commencement du siècle. Elles font toutes abstraction de la nature de la paroi, de la figure et de la grandeur du canal. Il est cependant difficile d'admettre *a priori* que ces divers éléments soient sans influenee sur l'écoulement. M. de Prony lui-même émet des doutes à cet égard dans plusieurs passages de ses recherches physico-mathématiques. Il ne se faisait donc aucunement illusion sur l'insuffisance des données expérimentales dont il pouvait disposer. »

Nous verrons plus loin comment MM. Darcy et Bazin ont prouvé cette insuffisance.

Diverses tables ont été dressées d'après les formules de de Prony et de ses successeurs ; elles sont aujourd'hui reconnues inexactes, et il est inutile de les reproduire ici.

Dans le cas où le lecteur en aurait besoin, il les trouvera dans les recueils de Genieys et Cousinery, ingénieurs en chef des ponts et chaussées.

EXPÉRIENCES ET FORMULES DE MM. DARCY ET BAZIN.

Vers 1850, M. Darcy, après avoir exécuté ses expériences si profondément utiles, relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux, entreprit des expériences analogues sur le mouvement dans les canaux. En 1856, M. Darcy s'adjoignit M. Bazin qui, depuis 1858, date de la mort de M. Darcy, a seul continué le travail.

« Il était réservé à M. Bazin de réunir, de compléter et de discuter les résultats de tant de nombreuses et délicates expériences, et d'en déduire, pour l'art de l'ingénieur, les conséquences importantes auxquelles elles conduisent. »

Procédés d'expérience. — Les expériences ont eu lieu dans une rigole placée le long d'un bief du canal de Bourgogne ; cette rigole rendait à la rivière d'Ouche les eaux qu'elle recevait du canal. La prise d'eau se composait de quatre vannes en tôle, ayant chacune 1 mètre de largeur et pouvant se lever de $0^m,40$; les orifices étaient garnis de tôle, afin que l'écoulement s'opérât en mince paroi. A la suite des quatre grandes vannes venait une chambre fermée à l'autre extrémité par douze petites vannes en cuivre, glissant entre des coulisseaux en cuivre ; on s'arrangeait de telle sorte que le plan d'eau fût toujours exactement à $0^m,80$ au-dessus du centre de ces petites vannes, et on obtenait de la sorte un débit absolument régulier qu'on pouvait du reste faire varier dans des limites assez étendues ; la constance du niveau dans la chambre d'alimentation était maintenue par un homme qui manœuvrait sans cesse les grandes vannes de prise d'eau, les yeux fixés sur un appareil qui indiquait immédiatement en les amplifiant, les moindres variations de niveau ; cet homme était comme le pilote qui, les yeux fixés sur le compas, agit sans cesse sur le gouvernail pour maintenir son navire dans une direction déterminée.

Après les petites vannes d'alimentation venait la rigole de $596^m,50$ de long, construite en planches de peuplier clouées longitudinalement sur des cadres espacés de $1^m,50$ environ ; cette rigole rectangulaire, d'une largeur uniforme de 2 mètres, était entourée d'une chape imperméable ; elle présentait une pente de $0^m,0049$ par mètre, sur 200 mètres de longueur à partir de l'origine, une pente de $0^m,002$ sur les 250 mètres suivants, et de $0^m,0084$ sur les $146^m,50$ restants.

Lorsqu'on voulut modifier soit la pente, soit la section d'écoulement, on établit, à l'intérieur de la rigole précédente, une autre rigole, et entre les deux parois on eut soin de pilonner de la terre, pour éviter les pertes d'eau.

Pour niveler la surface du courant, on avait eu soin de conserver les traverses horizontales supérieures des cadres de la rigole, et avec une règle à coulisse que l'on renversait en appuyant le talon sur la traverse, on mesurait exactement la profondeur du niveau de l'eau ; comme on connaissait la profondeur du fond de la rigole, on déduisait par différence la hauteur de la nappe d'eau.

Quant au nivellement du fond, il était fait simplement et très-exactement de la manière suivante : on fermait la rigole à l'aval au moyen d'un barrage étanche ; la surface de la nappe d'eau se maintenait donc horizontale dans la rigole, et on n'avait qu'à mesurer en face de chaque cadre la profondeur de l'eau pour obtenir le profil du fond.

Le débit était connu d'avance par le nombre des petites vannes qui étaient ouvertes ; il avait été déterminé par des expériences préalables. On connaissait par suite la vitesse moyenne U.

Il était non moins important de connaître la vitesse en un point quelconque ; les flotteurs ne donnent que des résultats peu certains, on eut recours au tube jaugeur de M. Darcy, dont nous donnerons plus loin la description et l'usage, en traitant du jaugeage des cours d'eau.

Influence de la nature de la paroi. — De Prony et ses successeurs faisaient abstraction de la nature des parois et ne tenaient compte que de la section et du périmètre mouillé ; ils supposaient qu'une pellicule liquide restait toujours adhérente à la paroi, et qu'en réalité l'écoulement de la masse se faisait sur cette pellicule, ce qui éliminait l'influence de la paroi.

Cette influence n'apparut point du reste, parce qu'on ne possédait que des expériences faites sur des canaux en planches ; M. Darcy constata le premier

que le débit d'un canal enduit en ciment était notablement supérieur à ce que donnait la formule de de Prony.

Des expériences préliminaires, exécutées par M. l'ingénieur Baumgarten sur le canal de Marseille et sur le canal de Craponne, montrèrent que la nature de la paroi a une grande influence sur l'écoulement.

Cette influence fut constatée et mesurée par M. Bazin :

Il recouvrit la rigole en planches, décrite plus haut, de quatre revêtements différents, savoir :

1° Ciment pur ;

2° Briques posées à plat ;

3° Petit gravier de $0^m,01$ à $0^m,02$ de diamètre, maintenu par un enduit en ciment sur lequel il était en saillie ;

4° Gros gravier de $0^m,03$ à $0^m,04$ de diamètre, maintenu de la même manière.

Des expériences comparatives furent faites en ayant soin de conserver pour les quatre enduits, mêmes pentes, mêmes sections, même débit ; la nature seule de la paroi était variable, et il était facile d'en apprécier l'influence par la différence des résultats trouvés.

En adoptant la formule :

$$A = \frac{RI}{U^2},$$

on trouva pour la valeur de A des différences très-considérables ; la valeur de ce coefficient A varie :

Pour le revêtement en	ciment.	de	0,000242	à	0,000172
—	planches.	de	0,000411	à	0,000229
—	briques.	de	0,000408	à	0,000277
—	petit gravier. . .	de	0,000862	à	0,000472
—	gros gravier. . .	de	0,001454	à	0.000661

L'influence de la nature de la paroi est encore mise en évidence par une expérience bien simple :

Soit un canal demi-circulaire de $1^m,25$ de diamètre, et de $0^m,0015$ de pente par mètre, dans lequel le niveau de l'eau est à la hauteur du centre ; ce canal étant en ciment mélangé d'un tiers de sable siliceux fin, débitait $1^m,03$ à la seconde ; construit avec du ciment pur, c'est-à-dire, présentant une surface plus lisse, il débitait $1^m,13$ à la seconde.

Dans les canaux en bois, les moisissures des parois suffisent à altérer notablement le débit ; dans un canal perreyé, le coefficient A peut être réduit à la moitié de sa valeur primitive, lorsqu'on gratte et qu'on enlève avec soin les mousses dont les pierres sont recouvertes.

Influence de la pente. — Les expériences précédentes montrent en outre que la formule monôme $RI = AU^2$, est insuffisante pour contenir les résultats numériques de toutes les expériences, et qu'il faut essayer une formule binôme.

On reconnaît en effet que la quantité $\left(\frac{RI}{U^2}\right)$ diminue lorsque le rayon moyen R et la vitesse moyenne U augmentent ; la diminution se ralentit progressivement et, à mesure que le débit augmente, la quantité $\left(\frac{RI}{U^2}\right)$ tend à devenir constante et à se rapprocher d'un nombre α.

D'après cela, on peut poser la relation :

$$\frac{RI}{U^2}=\alpha+f(R.U);$$

la fonction f tendant vers zéro lorsque le débit augmente, c'est-à-dire lorsque R et U augmentent.

D'après de Prony, la formule serait :

$$(1) \quad \frac{RI}{U^2}=\alpha+\frac{\beta}{U};$$

mais elle pourrait être aussi :

$$(2) \quad \frac{RI}{U^2}=\alpha+\frac{\beta}{R}.$$

C'est à l'expérience de décider laquelle de ces deux formules se rapproche le plus de la vérité.

M. Bazin a représenté graphiquement les équations (1) et (2), en adoptant pour abscisse X, soit la valeur de $\frac{1}{R}$, soit la valeur de $\frac{1}{U}$ et pour ordonnée Y la valeur de $\frac{RI}{U^2}$; pour chaque série d'expériences, il a ainsi trouvé une ligne droite dont l'équation est $Y=\alpha+\beta X$ et cette ligne droite résume tous les résultats numériques de chaque série d'expériences. En construisant en même temps les courbes que représentent les formules de de Prony et de M. de Saint-Venant, on a reconnu que ces courbes étaient loin de convenir aux nouvelles expériences, exécutées avec le plus grand soin.

Ainsi, les formules (1) et (2) paraissent jusqu'à présent également admissibles.

Mais, en cherchant les résultats qu'elles donnent lorsque la pente vient à varier d'une manière sensible, on reconnaît : 1° qu'en adoptant $\frac{1}{R}$ pour abscisse, les courbes des diverses séries sont très-rapprochées les unes des autres et presque confondues, de sorte qu'on peut les comprendre dans une formule unique; 2° qu'en adoptant au contraire $\frac{1}{U}$ pour abscisse, les courbes des diverses séries s'éloignent rapidement les unes des autres, de sorte que, pour chaque série d'expériences, il faut une formule nouvelle.

C'est donc la formule :

$$\frac{RI}{U^2}=\alpha+\frac{\beta}{R},$$

qu'il convient d'adopter, et qui est seule apte à représenter l'ensemble des phénomènes. Ses deux coefficients ne sont pas, il est vrai, absolument indépendants de la pente; mais ils varient dans des limites bien moins étendues que ceux de la formule (1).

« La supériorité pratique de la formule $\alpha+\frac{\beta}{R}$, dit M. Bazin, résulte de ce que ses deux coefficients varient en sens inverse lorsque l'on modifie la pente I

du canal ; en effet, quand I augmente, α augmente aussi et β diminue. Il s'établit ainsi une sorte de compensation, par suite de laquelle les formules obtenues pour plusieurs pentes, bien que différentes au premier abord, donnent néanmoins dans les limites ordinaires des applications des valeurs presque identiques de $\frac{RI}{U^2}$ et par suite peuvent sans inconvénient être remplacées par une formule unique à coefficients moyens. Il n'en est plus de même pour l'expression $\alpha + \frac{\beta}{U}$ dont les coefficients augmentent tous deux rapidement avec la pente du canal. »

Influence de la forme de la section. — Les sections qu'on rencontre dans la pratique sont : le rectangle, le trapèze, le triangle lorsque la largeur au fond est petite relativement à la profondeur et l'arc de cercle qui appartient à certaines rigoles maçonnées.

De ses expériences M. Bazin conclut que :

« 1° La figure de la section transversale ne paraît pas exercer une influence assez grande pour qu'il y ait lieu d'en tenir compte dans les applications lorsque cette figure est un rectangle, un trapèze ou un triangle. Les expériences comparatives, qui ont conduit à ce résultat, n'ont été faites, il est vrai, que sur des parois en planches ; il paraît néanmoins vraisemblable que des parois plus résistantes conduiraient à des conclusions analogues ;

« 2° La résistance à l'écoulement est notablement moindre dans un canal arrondi qui ne présente aucun angle vif à l'intérieur. Ce fait s'explique très-facilement lorsqu'on étudie la distribution des vitesses dans l'intérieur d'un courant. On reconnaît en effet que, dans un canal rectangulaire, la vitesse dans les angles est très-petite relativement à la vitesse moyenne, de telle sorte que cette partie de la section ne contribue que pour une faible part au débit total. Dans un canal circulaire, au contraire, la vitesse est la même sur toute l'étendue de la paroi et diffère moins de la vitesse moyenne. C'est donc avec beaucoup de raison que l'on adopte souvent pour le profil transversal de la cuvette des égouts une forme à peu près circulaire. Cette figure est celle qui donne le maximum d'écoulement pour une pente et une section données ;

« 3° Dans le cas particulier où la section d'un canal est très-petite ($0^m,10$ de largeur, par exemple), le rapport $\frac{RI}{U}$ devient constant pour un même canal, c'est-à-dire que la vitesse U est simplement proportionnelle à R. »

Expériences pratiques sur les rigoles du canal de Bourgogne. — M. Bazin a exécuté dix-neuf séries d'expériences sur diverses rigoles du canal de Bourgogne ; ces expériences ont donc été faites dans des conditions essentiellement pratiques.

Une des rigoles d'expérience était la rigole de décharge du réservoir de Grosbois ; elle est construite en moellons piqués, rejointoyés en ciment ; sa largeur est de $1^m,80$ au fond et ses parois latérales ont un fruit de $\frac{1}{10}$. On a expérimenté des vitesses qui ont atteint jusqu'à $9^m,16$ par seconde, c'est-à-dire une valeur à peu près inconnue jusqu'à ce jour ; cette vitesse se manifestait sur une pente de $0^m,101$.

On a expérimenté aussi la rigole de décharge du bief n° 52 ; elle est en terre revêtue d'un perré ; son profil transversal est un trapèze de 2 mètres de largeur au plafond avec perrés inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur. Le perré était en médiocre état de conservation, recouvert de mousse et de gazon ; après une première série d'expériences, on l'a gratté et nettoyé et on a recommencé l'opéra-

tion pour se rendre compte de l'influence de l'état des parois. Bien que la mousse et le gazon ne réduisissent que fort peu la section, leur influence était énorme puisque, après l'opération, la valeur de $\frac{RI}{U^2}$ se trouva réduite de moitié.

Enfin, on a expérimenté les rigoles de Chazilly et de Grosbois, qui sont de grande longueur, établies partie en terre, partie en maçonnerie, et présentant sur plusieurs sections des parois de nature très-différente. « Les résultats de ces expériences, dit M. Bazin, sont très-variés et sont loin d'offrir la régularité de ceux qui ont été obtenus sur des canaux construits spécialement pour des recherches expérimentales. Un canal en terre, avec quelque soin qu'il ait d'ailleurs été établi, offre de nombreuses irrégularités ; le profil en long de la surface, au lieu de présenter une pente régulière, est toujours sensiblement ondulé et se modifie même un peu d'un jour à l'autre suivant les petits changements qui s'opèrent sans cesse dans l'état du lit.

Formules pratiques. — A ses propres expériences, M. Bazin a réuni :

1° Les expériences de Dubuat exécutées sur de petits canaux en planches, sur le canal du Jard et sur la rivière de Hayne ;

2° Celles de Brünings, exécutées de 1790 à 1792 sur les bras du Rhin ;

3° Les nombreuses expériences de Funk, exécutées sur le Weser de 1803 à 1806.

4° Quatre expériences de Woltmann sur de petits canaux en terre près Cuxhaven ;

5° Les expériences de Bidone sur un petit canal en briques, et celles des ingénieurs italiens sur le Pô et le Tibre.

De toutes ces expériences, M. Bazin a déduit quatre formules applicables à quatre natures de paroi :

1° **Parois très-unies.** — *Ciment lissé, bois raboté avec soin*, etc...

$$(1) \qquad \frac{RI}{U^2} = 0{,}00015 \left(1 + \frac{0{,}03}{R}\right)$$

2° **Parois unies.** — *Pierre de taille, brique, planches.*

$$(2) \qquad \frac{RI}{U^2} = 0{,}00019 \left(1 + \frac{0{,}07}{R}\right)$$

3° **Parois peu unies en maçonnerie de moellons.**

$$(3) \qquad \frac{RI}{U^2} = 0{,}00024 \left(1 + \frac{0{,}25}{R}\right)$$

4° **Parois en terre.** — *Petits cours d'eau, rivières et fleuves*

$$(4) \qquad \frac{RI}{U^2} = 0{,}00028 \left(1 + \frac{1{,}25}{R}\right)$$

Tables numériques. — Pour faciliter les calculs, M. Bazin a dressé des tables numériques fort utiles donnant : la première les valeurs de $\frac{RI}{U^2}$ et la seconde les valeurs de $\frac{U}{\sqrt{RI}}$; ces tables sont très-étendues et embrassent à peu près tous les cas de la pratique. Nous aurons lieu de nous en servir plus loin ; ici, nous nous contenterons de les reproduire :

TABLEAU DES VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$ FOURNIES PAR LES QUATRE FORMULES TYPES PRÉCÉDENTES, POUR DES VALEURS DU RAYON MOYEN R COMPRISES ENTRE $0^m,01$ ET 6 MÈTRES.

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.				VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.			
	Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.		Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,01	0,000600	»	»	»	0,38	0,000162	0,000225	0,000398	0,001201
0,02	0,000375	0,000855	»	»	0,39	0,000162	0,000224	0,000394	0,001177
0,03	0,000300	0,000633	»	»	0,40	0,000161	0,000223	0,000390	0,001155
0,04	0,000262	0,000522	»	»	0,41	0,000161	0,000222	0,000386	0,001134
0,05	0,000240	0,000456	0,001440	»	0,42	0,000161	0,000222	0,000383	0,001113
0,06	0,000225	0,000412	0,001240	»	0,43	0,000160	0,000221	0,000380	0,001094
0,07	0,000214	0,000380	0,001097	»	0,44	0,000160	0,000220	0,000376	0,001075
0,08	0,000206	0,000356	0,000990	»	0,45	0,000160	0,000220	0,000373	0,001058
0,09	0,000200	0,000338	0,000907	»	0,46	0,000160	0,000219	0,000370	0,001041
0,10	0,000195	0,000323	0,000840	0,003780	0,47	0,000160	0,000218	0,000368	0,001025
0,11	0,000191	0,000311	0,000785	0,003462	0,48	0,000159	0,000218	0,000365	0,001009
0,12	0,000188	0,000301	0,000740	0,003197	0,49	0,000159	0,000217	0,000362	0,000994
0,13	0,000185	0,000292	0,000702	0,002972	0,50	0,000159	0,000217	0,000360	0,000980
0,14	0,000182	0,000285	0,000669	0,002780	0,51	0,000159	0,000216	0,000358	0,000966
0,15	0,000180	0,000279	0,000640	0,002613	0,52	0,000159	0,000216	0,000355	0,000953
0,16	0,000178	0,000273	0,000615	0,002468	0,53	0,000158	0,000215	0,000353	0,000940
0,17	0,000176	0,000268	0,000593	0,002339	0,54	0,000158	0,000215	0,000351	0,000928
0,18	0,000175	0,000264	0,000573	0,002224	0,55	0,000158	0,000214	0,000349	0,000916
0,19	0,000174	0,000260	0,000556	0,002122	0,56	0,000158	0,000214	0,000347	0,000905
0,20	0,000172	0,000256	0,000540	0,002030	0,57	0,000158	0,000213	0,000345	0,000894
0,21	0,000171	0,000253	0,000526	0,001947	0,58	0,000158	0,000213	0,000343	0,000883
0,22	0,000170	0,000250	0,000513	0,001871	0,59	0,000158	0,000213	0,000342	0,000873
0,23	0,000170	0,000248	0,000501	0,001802	0,60	0,000158	0,000212	0,000340	0,000863
0,24	0,000169	0,000245	0,000490	0,001738	0,61	0,000157	0,000212	0,000338	0,000854
0,25	0,000168	0,000243	0,000480	0,001680	0,62	0,000157	0,000211	0,000337	0,000845
0,26	0,000167	0,000241	0,000471	0,001626	0,63	0,000157	0,000211	0,000335	0,000836
0,27	0,000167	0,000239	0,000462	0,001576	0,64	0,000157	0,000211	0,000334	0,000827
0,28	0,000166	0,000237	0,000454	0,001530	0,65	0,000157	0,000210	0,000332	0,000818
0,29	0,000166	0,000236	0,000447	0,001487	0,66	0,000157	0,000210	0,000331	0,000810
0,30	0,000165	0,000234	0,000440	0,001447	0,67	0,000157	0,000210	0,000330	0,000802
0,31	0,000165	0,000233	0,000434	0,001409	0,68	0,000157	0,000210	0,000328	0,000795
0,32	0,000164	0,000232	0,000428	0,001374	0,69	0,000157	0,000209	0,000327	0,000787
0,33	0,000164	0,000230	0,000422	0,001341	0,70	0,000156	0,000209	0,000326	0,000780
0,34	0,000163	0,000229	0,000416	0,001309	0,71	0,000156	0,000209	0,000325	0,000773
0,35	0,000163	0,000228	0,000411	0,001280	0,72	0,000156	0,000208	0,000323	0,000766
0,36	0,000163	0,000227	0,000407	0,001252	0,73	0,000156	0,000208	0,000322	0,000759
0,37	0,000162	0,000226	0,000402	0,001226	0,74	0,000156	0,000208	0,000321	0,000753

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.				VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.			
	Parois très unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.		Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,75	0,000156	0,000208	0,000320	0,000747	1,54	0,000153	0,000199	0,000279	0,000507
0,76	0,000156	0,000208	0,000319	0,000741	1,56	0,000153	0,000199	0,000278	0,000504
0,77	0,000156	0,000207	0,000318	0,000735	1,58	0,000153	0,000198	0,000278	0,000502
0,78	0,000156	0,000207	0,000317	0,000729	1,60	0,000153	0,000198	0,000277	0,000499
0,79	0,000156	0,000207	0,000316	0,000723	1,62	0,000153	0,000198	0,000277	0,000496
0,80	0,000156	0,000207	0,000315	0,000718	1,64	0,000153	0,000198	0,000277	0,000493
0,81	0,000156	0,000206	0,000314	0,000712	1,66	0,000153	0,000198	0,000276	0,000491
0,82	0,000155	0,000206	0,000313	0,000707	1,68	0,000153	0,000198	0,000276	0,000488
0,83	0,000155	0,000206	0,000312	0,000702	1,70	0,000153	0,000198	0,000275	0,000486
0,84	0,000155	0,000206	0,000311	0,000697	1,72	0,000153	0,000198	0,000275	0,000483
0,85	0,000155	0,000206	0,000311	0,000692	1,74	0,000153	0,000198	0,000274	0,000481
0,86	0,000155	0,000205	0,000310	0,000687	1,76	0,000153	0,000198	0,000274	0,000479
0,87	0,000155	0,000205	0,000309	0,000682	1,78	0,000153	0,000197	0,000274	0,000477
0,88	0,000155	0,000205	0,000308	0,000678	1,80	0,000153	0,000197	0,000273	0,000474
0,89	0,000155	0,000205	0,000307	0,000673	1,82	0,000152	0,000197	0,000273	0,000472
0,90	0,000155	0,000205	0,000307	0,000669	1,84	0,000152	0,000197	0,000273	0,000470
0,91	0,000155	0,000205	0,000306	0,000665	1,86	0,000152	0,000197	0,000272	0,000468
0,92	0,000155	0,000204	0,000305	0,000660	1,88	0,000152	0,000197	0,000272	0,000466
0,93	0,000155	0,000204	0,000305	0,000656	1,90	0,000152	0,000197	0,000272	0,000464
0,94	0,000155	0,000204	0,000304	0,000652	1,92	0,000152	0,000197	0,000271	0,000462
0,95	0,000155	0,000204	0,000303	0,000648	1,94	0,000152	0,000197	0,000271	0,000460
0,96	0,000155	0,000204	0,000303	0,000645	1,96	0,000152	0,000197	0,000271	0,000459
0,97	0,000155	0,000204	0,000302	0,000641	1,98	0,000152	0,000197	0,000270	0,000457
0,98	0,000155	0,000204	0,000301	0,000637	2,00	0,000152	0,000197	0,000270	0,000455
0,99	0,000155	0,000203	0,000301	0,000634	2,10	0,000152	0,000196	0,000269	0,000447
1,00	0,000155	0,000203	0,000300	0,000630	2,20	0,000152	0,000196	0,000267	0,000439
					2,30	0,000152	0,000196	0,000266	0,000432
1,02	0,000154	0,000203	0,000299	0,000623	2,40	0,000152	0,000196	0,000265	0,000426
1,04	0,000154	0,000203	0,000298	0,000617	2,50	0,000152	0,000195	0,000264	0,000420
1,06	0,000154	0,000203	0,000297	0,000610	2,60	0,000152	0,000195	0,000263	0,000415
1,08	0,000154	0,000202	0,000296	0,000604	2,70	0,000152	0,000195	0,000262	0,000410
1,10	0,000154	0,000202	0,000295	0,000598	2,80	0,000152	0,000195	0,000261	0,000405
1,12	0,000154	0,000202	0,000294	0,000592	2,90	0,000152	0,000195	0,000261	0,000401
1,14	0,000154	0,000202	0,000293	0,000587	3,00	0,000152	0,000194	0,000260	0,000397
1,16	0,000154	0,000201	0,000292	0,000582	3,10	0,000151	0,000194	0,000259	0,000393
1,18	0,000154	0,000201	0,000291	0,000577	3,20	0,000151	0,000194	0,000259	0,000389
1,20	0,000154	0,000201	0,000290	0,000572	3,30	0,000151	0,000194	0,000258	0,000386
1,22	0,000154	0,000201	0,000289	0,000567	3,40	0,000151	0,000194	0,000258	0,000383
1,24	0,000154	0,000201	0,000288	0,000562	3,50	0,000151	0,000194	0,000257	0,000380
1,26	0,000154	0,000201	0,000288	0,000558	3,60	0,000151	0,000194	0,000257	0,000377
1,28	0,000154	0,000200	0,000287	0,000553	3,70	0,000151	0,000194	0,000256	0,000375
1,30	0,000153	0,000200	0,000286	0,000549	3,80	0,000151	0,000194	0,000256	0,000372
1,32	0,000153	0,000200	0,000285	0,000545	3,90	0,000151	0,000193	0,000255	0,000370
1,34	0,000153	0,000200	0,000285	0,000541	4,00	0,000151	0,000193	0,000255	0,000368
1,36	0,000153	0,000200	0,000284	0,000537					
1,38	0,000153	0,000200	0,000283	0,000534	4,25	0,000151	0,000193	0,000254	0,000362
1,40	0,000153	0,000199	0,000283	0,000530	4,50	0,000151	0,000193	0,000253	0,000358
1,42	0,000153	0,000199	0,000282	0,000526	4,75	0,000151	0,000193	0,000253	0,000354
1,44	0,000153	0,000199	0,000282	0,000523	5,00	0,000151	0,000193	0,000252	0,000350
1,46	0,000153	0,000199	0,000281	0,000520	5,25	0,000151	0,000193	0,000251	0,000347
1,48	0,000153	0,000199	0,000281	0,000516	5,50	0,000151	0,000192	0,000251	0,000344
1,50	0,000153	0,000199	0,000280	0,000513	5,75	0,000151	0,000192	0,000250	0,000341
1,52	0,000153	0,000199	0,000279	0,000510	6,00	0,000151	0,000192	0,000250	0,000338

TABLE DONNANT LES VALEURS DE $\frac{U}{\sqrt{RI}}$ CORRESPONDANTES AUX VALEURS DU RAYON MOYEN R COMPRISES ENTRE $0^m,01$ ET $6^m,00$.

VALEURS DE R.	VALEURS DE $\frac{U}{\sqrt{RI}}$. PAROIS TRÈS-UNIES (ciment lissé, bois raboté avec soin).	PAROIS UNIES (planches, pierre de taille).	PAROIS PEU UNIES (en maçonnerie de moellons).	PAROIS EN TERRE.	VALEURS DE R.	VALEURS DE $\frac{U}{\sqrt{RI}}$. PAROIS TRÈS-UNIES (ciment lissé, bois raboté avec soin).	PAROIS UNIES (planches, pierre de taille).	PAROIS PEU UNIES (en maçonnerie de moellons).	PAROIS EN TERRE.
0,01	40,8	»	»	»	0,41	78,8	67,1	50,9	29,7
0,02	51,6	34,2	»	»	0,42	78,9	67,2	51,1	30,0
0,03	57,7	39,7	»	»	0,43	78,9	67,3	51,3	30,2
0,04	61,7	43,8	»	»	0,44	79,0	67,4	51,5	30,5
0,05	64,6	46,8	26,4	»	0,45	79,1	67,5	51,8	30,7
0,06	66,7	49,3	28,4	»	0,46	79,1	67,6	52,0	31,0
0,07	68,3	51,3	30,2	»	0,47	79,2	67,7	52,2	31,2
0,08	69,6	53,0	31,8	»	0,48	79,2	67,8	52,3	31,5
0,09	70,7	54,4	33,2	»	0,49	79,3	67,9	52,5	31,7
0,10	71,6	55,6	34,5	16,3	0,50	79,3	67,9	52,7	31,9
0,11	72,4	56,7	35,7	17,0	0,51	79,4	68,0	52,9	32,2
0,12	73,0	57,7	36,8	17,7	0,52	79,4	68,1	53,0	32,4
0,13	73,6	58,5	37,8	18,3	0,53	79,4	68,2	53,2	32,6
0,14	74,1	59,2	38,7	19,0	0,54	79,5	68,3	53,4	3[illegible],8
0,15	74,5	59,9	39,5	19,6	0,55	79,5	68,3	53,5	33,0
0,16	74,9	60,5	40,3	20,1	0,56	79,5	68,4	53,7	33,2
0,17	75,3	61,1	41,1	20,7	0,57	79,6	68,5	53,8	33,4
0,18	75,6	61,6	41,8	21,2	0,58	79,6	68,5	54,0	33,6
0,19	75,9	62,0	42,4	21,7	0,59	79,6	68,6	54,1	33,8
0,20	76,1	62,4	43,0	22,2	0,60	79,7	68,7	54,2	34,0
0,21	76,4	62,8	43,6	22,7	0,61	79,7	68,7	54,4	34,2
0,22	76,6	63,2	44,2	23,1	0,62	79,7	68,8	54,5	34,4
0,23	76,8	63,5	44,7	23,6	0,63	79,8	68,8	54,6	34,6
0,24	77,0	63,8	45,2	24,0	0,64	79,8	68,9	54,7	34,8
0,25	77,2	64,1	45,6	24,4	0,65	79,8	68,9	54,9	35,0
0,26	77,3	64,4	46,1	24,8	0,66	79,9	69,0	55,0	35,1
0,27	77,5	64,7	46,5	25,2	0,67	79,9	69,0	55,1	35,3
0,28	77,6	64,9	46,9	25,6	0,68	79,9	69,1	55,2	35,5
0,29	77,7	65,1	47,3	25,9	0,69	79,9	69,1	55,3	35,7
0,30	77,9	65,3	47,7	26,3	0,70	80,0	69,2	55,4	35,8
0,31	78,0	65,5	48,0	26,6	0,71	80,0	69,2	55,5	36,0
0,32	78,1	65,7	48,4	27,0	0,72	80,0	69,3	55,6	36,1
0,33	78,2	65,9	48,7	27,3	0,73	80,0	69,3	55,7	36,3
0,34	78,3	66,1	49,0	27,6	0,74	80,0	69,3	55,8	36,4
0,35	78,4	66,2	49,3	28,0	0,75	80,1	69,4	55,9	36,6
0,36	78,5	66,4	49,6	28,3	0,76	80,1	69,4	56,0	36,8
0,37	78,5	66,5	49,9	28,6	0,77	80,1	69,5	56,1	36,9
0,38	78,6	66,7	50,1	28,9	0,78	80,1	69,5	56,2	37,0
0,39	78,7	66,8	50,4	29,2	0,79	80,1	69,5	56,3	37,2
0,40	78,8	66,9	50,6	29,4	0,80	80,2	69,6	56,3	37,3

VALEURS DE R.	VALEURS DE $\frac{U}{\sqrt{RI}}$.				VALEURS DE R.	VALEURS DE $\frac{U}{\sqrt{RI}}$.			
	PAROIS TRÈS-UNIES (ciment lissé, bois raboté avec soin).	PAROIS UNIES (planches, pierre de taille).	PAROIS PEU UNIES (en maçonnerie de moellons).	PAROIS EN TERRE.		PAROIS TRÈS-UNIES (ciment lissé, bois raboté avec soin).	PAROIS UNIES (planches, pierre de taille).	PAROIS PEU UNIES (en maçonnerie de moellons).	PAROIS EN TERRE.
0,81	80,2	69,6	56,4	37,5	1,62	80,9	71,0	60,1	44,9
0,82	80,2	69,6	56,5	37,6	1,64	80,9	71,1	60,1	45,0
0,83	80,2	69,7	56,6	37,8	1,66	80,9	71,1	60,2	45,1
0,84	80,2	69,7	56,7	37,9	1,68	80,9	71,1	60,2	45,3
0,85	80,2	69,7	56,8	38,0	1,70	80,9	71,1	60,3	45,4
0,86	80,3	69,8	56,8	38,2	1,72	80,9	71,1	60,3	45,5
0,87	80,3	69,8	56,9	38,3	1,74	81,0	71,1	60,4	45,6
0,88	80,3	69,8	57,0	38,4	1,76	81,0	71,1	60,4	45,7
0,89	80,3	69,9	57,0	38,5	1,78	81,0	71,2	60,4	45,8
0,90	80,3	69,9	57,1	38,7	1,80	81,0	71,2	60,5	45,9
0,91	80,3	69,9	57,2	38,8	1,82	81,0	71,2	60,5	46,0
0,92	80,3	69,9	57,2	38,9	1,84	81,0	71,2	60,6	46,1
0,93	80,4	70,0	57,3	39,0	1,86	81,0	71,2	60,6	46,2
0,94	80,4	70,0	57,4	39,2	1,88	81,0	71,2	60,6	46,3
0,95	80,4	70,0	57,4	39,3	1,90	81,0	71,2	60,7	46,4
0,96	80,4	70,0	57,5	39,4	1,92	81,0	71,3	60,7	46,5
0,97	80,4	70,1	57,6	39,5	1,94	81,0	71,3	60,8	46,6
0,98	80,4	70,1	57,6	39,6	1,96	81,0	71,3	60,8	46,7
0,99	80,4	70,1	57,7	39,7	1,98	81,0	71,3	60,8	46,8
1,00	80,4	70,1	57,7	39,8	2,00	81,0	71,3	60,9	46,9
1,02	80,5	70,2	57,9	40,1					
1,04	80,5	70,2	58,0	40,3	2,10	81,1	71,4	61,0	47,3
1,06	80,5	70,3	58,1	40,5	2,20	81,1	71,4	61,2	47,7
1,08	80,5	70,3	58,2	40,7	2,30	81,1	71,5	61,3	48,1
1,10	80,6	70,3	58,3	40,9	2,40	81,1	71,5	61,4	48,5
1,12	80,6	70,4	58,4	41,1	2,50	81,2	71,6	61,5	48,8
1,14	80,6	70,4	58,5	41,3	2,60	81,2	71,6	61,6	49,1
1,16	80,6	70,4	58,6	41,5	2,70	81,2	71,6	61,8	49,4
1,18	80,6	70,5	58,6	41,6	2,80	81,2	71,7	61,9	49,7
1,20	80,6	70,5	58,7	41,8	2,90	81,2	71,7	61,9	50,0
1,22	80,7	70,5	58,8	42,0	3,00	81,2	71,7	62,0	50,2
1,24	80,7	70,6	58,9	42,2	3,10	81,3	71,7	62,1	50,4
1,26	80,7	70,6	59,0	42,3	3,20	81,3	71,8	62,1	50,7
1,28	80,7	70,6	59,0	42,5	3,30	81,3	71,8	62,2	50,9
1,30	80,7	70,7	59,1	42,7	3,40	81,3	71,8	62,3	51,1
1,32	80,7	70,7	59,2	42,8	3,50	81,3	71,8	62,3	51,3
1,34	80,7	70,7	59,3	43,0	3,60	81,3	71,9	62,4	51,5
1,36	80,8	70,7	59,3	43,1	3,70	81,3	71,9	62,5	51,7
1,38	80,8	70,8	59,4	43,3	3,80	81,3	71,9	62,5	51,9
1,40	80,8	70,8	59,5	43,4	3,90	81,3	71,9	62,6	52,0
1,42	80.8	70,8	59,5	43,6	4,00	81,3	71,9	62,6	52,2
1,44	80,8	70,8	59,6	43,7					
1,46	80,8	70,9	59,6	43,9	4,25	81,4	72,0	62,7	52,5
1,48	80,8	79,9	59,7	44,0	4,50	81,4	72,0	62,8	52,9
1,50	80,8	70,9	59,8	44,1	4,75	81,4	72,0	62,9	53,2
1,52	80,9	70,9	59,8	44,3	5,00	81,4	72,0	63,0	53,5
1,54	80,9	71,0	59,9	44,4	5,25	81,4	72,1	63,1	53,7
1,56	80,9	71,0	59,9	44,5	5,50	81,4	72,1	63,1	53,9
1,58	89,9	71,0	60,0	44,7	5,75	81,4	72,1	63,2	54,2
1,60	80,9	71,0	60,0	44,8	6,00	81,4	72,1	63,2	54,4

Répartition des vitesses dans la section d'un canal. — Les formules précédentes ne dépendent que de la vitesse moyenne U du courant, c'est-à-dire d'une quantité arithmétique qui est le quotient du débit par la section : le débit à la seconde étant représenté par un prisme droit ayant pour section précisément celle du courant, la vitesse moyenne U est mesurée par la hauteur de ce prisme.

Comment cette vitesse moyenne est-elle liée à la vitesse à la surface, à la vitesse au fond, à la vitesse en un point quelconque? C'est ce qu'il serait de la plus haute importance de connaître et ce que, malheureusement, nous ne pouvons dire que d'une manière approximative.

Les expériences de M. Bazin ont jeté un grand jour sur la question; elles ont été faites au moyen du tube jaugeur de Darcy que nous décrirons plus loin.

Rapport de la vitesse moyenne à la vitesse maxima. — On a longtemps admis que la vitesse maxima se produisait à la surface du courant; on la déterminait à l'aide de flotteurs et, mettant en regard les valeurs de cette vitesse V et de la vitesse moyenne U, on pouvait établir la relation empirique qui les lie l'une à l'autre.

C'est ce qu'a fait de Prony; il a donné la formule

$$\frac{U}{V}=\frac{V+2,37}{V+3,15},$$

qui est l'équation d'une hyperbole, dont une des asymptotes est parallèle aux ordonnées U.

Souvent, on simplifiait cette formule et on se contentait de prendre

$$U=\frac{4}{5}V .$$

Maintenant que nous connaissons toute l'influence que présente la nature des parois sur la vitesse moyenne, nous savons bien que les deux formules précédentes, qui peuvent convenir à une série déterminée d'expériences, sont fausses dans la généralité des cas. La recherche de la vitesse maxima présente du reste par elle-même des difficultés assez grandes.

« En effet, dit le rapport fait à l'Académie des Sciences sur le travail de M. Bazin, quoique dans les cours d'eau les filets animés de la vitesse maxima soient en général très-près de la surface, on sait cependant que, dans les courants profonds, cette vitesse maxima ne se trouve qu'à une distance de la surface d'autant plus grande que la profondeur est plus considérable par rapport à la largeur. Il y a longtemps que les bateliers du Rhin et nos pontonniers savent qu'un bateau chargé et ayant un fort tirant d'eau, marche, en descendant, plus vite que l'eau qui le soutient ou que les corps qui flottent à la surface.

« Il suit de là que les observations faites avec des flotteurs ne donnent pas toujours la vitesse maxima, à moins qu'ils ne soient convenablement immergés.

« D'une autre part, quand, à l'inverse, le courant n'a qu'une petite profondeur, pour peu que le flotteur soit épais, la plus grande vitesse étant alors très-près de la surface, il est très-difficile de contrôler les indications du flotteur par celles du tube jaugeur, qui ne sont exactes que quand ce tube est convenablement immergé.

« On comprend, par ce peu de mots, la difficulté du problème que se propo-

sait d'étudier M. Bazin et la nécessité où il s'est trouvé de choisir parmi les séries d'expériences dont il disposait celles qui étaient le moins exposées aux anomalies que nous venons d'indiquer. »

M. Bazin s'est posé le problème de déterminer la distribution des vitesses entre les différents filets fluides d'un courant. « Ces expériences ont été exécutées de la manière suivante : après avoir choisi le point où le régime du courant paraissait offrir le plus de régularité, on a relevé exactement le profil transversal et l'on a mesuré, à l'aide du tube jaugeur, les vitesses en un grand nombre de points de la section. » La vitesse moyenne U est ainsi connue avec une grande exactitude ainsi que la vitesse maxima V.

De nombreuses séries d'expériences ont montré que le rapport $\frac{U}{V}$ décroît en même temps que la résistance à la paroi augmente. Ainsi, avec des parois très-lisses, telles qu'un enduit de ciment, ce rapport peut atteindre 0,85, et dans des canaux en terre, au contraire, il descend jusqu'à 0,50.

En somme le rapport $\frac{U}{V}$ dépend de la résistance à la paroi, résistance qui est mesurée dans chaque cas par la quantité $\frac{RI}{U^2}$ que M. Bazin appelle A et dont les valeurs successives sont inscrites aux tables précédentes.

Si A tend vers zéro, c'est que la résistance des parois devient de plus en plus faible et tend à s'annuler, la vitesse de son côté varie très-peu d'un point à l'autre et le rapport $\left(\frac{V}{U}\right)$ tend vers l'unité. On peut donc représenter ce rapport par une équation de la forme :

$$\frac{V}{U}=1+f(A)$$

la fonction f s'annulant en même temps que A.

Après quelques essais, M. Bazin est arrivé à la formule suivante :

$$(1) \qquad \frac{V}{U}=1+14\sqrt{A}$$

ou, en remplaçant A par sa valeur $\frac{RI}{U^2}$,

$$(2) \qquad V-U=14\sqrt{RI}.$$

Nous reproduirons ici les deux tables qu'a dressées M. Bazin et qui donnent la valeur du rapport $\frac{U}{V}$, la première en regard des valeurs de A ou de $\frac{RI}{U^2}$ et la seconde en regard du rayon moyen R ; dans ce dernier cas, comme le rapport dépend non-seulement de la grandeur de la section mais de la nature des parois, il faut distinguer dans quelle catégorie on doit ranger les parois du canal considéré.

TABLE DONNANT LES VALEURS DU RAPPORT $\frac{U}{V}$ DES VITESSES MOYENNE ET MAXIMA CORRESPONDANTES AUX VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$ COMPRISES ENTRE 0,00015 ET 0,003.

VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.	VALEURS DE $\frac{U}{V}$.	VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.	VALEURS DE $\frac{U}{V}$.	VALEURS DE $\frac{RI}{U^2}$.	VALEURS DE $\frac{U}{V}$.
0,000150	0,854	0,000475	0,766	0,001160	0,677
0,000155	0,852	0,000480	0,765	0,001180	0,675
0,000160	0,850	0,000485	0,764	0,001200	0,673
0,000165	0,848	0,000490	0,763	0,001220	0,672
0,000170	0,846	0,000495	0,763	0,001240	0,670
0,000175	0,844	0,000500	0,762	0,001260	0,668
0,000180	0,842			0,001280	0,666
0,000185	0,840	0,000510	0,760	0,001300	0,665
0,000190	0,838	0,000520	0,758	0,001320	0,663
0,000195	0,836	0,000530	0,756	0,001340	0,661
0,000200	0,835	0,000540	0,754	0,001360	0,659
0,000205	0,833	0,000550	0,753	0,001380	0,658
0,000210	0,831	0,000560	0,751	0,001400	0,656
0,000215	0,830	0,000570	1,750	0,001420	0,655
0,000220	0,828	0,000580	0,748	0,001440	0,653
0,000225	0,826	0,000590	0,746	0,001460	0,651
0,000230	0,825	0,000600	0,745	0,001480	0,650
0,000235	0,023	0,000610	0,743	0,001500	0,648
0,000240	0,822	0,000620	0,741	0,001520	0,647
0,000245	0,820	0,000630	0,740	0,001540	0,645
0,000250	0,819	0,000640	0,739	0,001560	0,644
0,000255	0,817	0,000650	0,737	0,001580	0,643
0,000260	0,816	0,000660	0,735	0,001600	0,641
0,000265	0,814	0,000670	0,734	0,001620	0,640
0,000270	8,813	0,000680	0,733	0,001640	0,638
0,000275	0,812	0,000690	0,731	0,001660	0,637
0,000280	0,810	0,000700	0,730	0,001680	0,635
0,000285	0,809	0,000710	0,728	0,001700	0,634
0,000290	0,808	0,000720	0,727	0,001720	0,633
0,000295	0,806	0,000730	0,726	0,001740	0,631
0,000300	0,805	0,000740	0,724	0,001760	0,630
0,000305	0,803	0,000750	0,723	0,001780	0,629
0,000310	0,802	0,000760	0,721	0,001800	0,627
0,000315	0,801	0,000770	0,720	0,001820	0,626
0,000320	0,800	0,000780	0,719	0,001840	0,625
0,000325	0,798	0,000790	0,718	0,001860	0,623
0,000330	0,797	0,000800	0,716	0,001880	0,622
0,000335	0,796	0,000810	0,715	0,001900	0,621
0,000340	0,795	0,000820	0,714	0,001920	0,620
0,000345	0,794	0,000830	0,713	0,001930	0,619
0,000350	0,792	0,000840	0,711	0,001960	0,617
0,000355	0,791	0,000850	0,710	0,001980	0,616
0,000360	0,790	0,000860	0,709	0,002000	0,615
0,000365	0,789	0,000870	0,708		
0,000370	0,788	0,000880	0,707		
0,000375	0,787	0,000890	0,705	0,002050	0,612
0,000380	0,786	0,000900	0,704	0,002100	0,609
0,000385	0,784	0,000910	0,703	0,002150	0,606
0,000390	0,783	0,000920	0,702	0,002200	0,604
0,000395	0,782	0,000950	0,701	0,002250	0,601
0,000400	0,781	0,000940	0,700	0,002300	0,598
0,000405	0,780	0,000950	0,699	0,002350	0,596
0,000410	0,779	0,000960	0,697	0,002400	0,593
0,000415	0,778	0,000970	0,696	0,002450	0,591
0,000420	0,777	0,000980	0,695	0,002500	0,588
0,000425	0,776	0,000990	0,694	0,002550	0,586
0,000430	0,775	0,001000	0,693	0,002600	0,584
0,000435	0,774			0,002650	0,581
0,000440	0,773	0,001020	0,691	0,002700	0,579
0,000415	0,772	0,001010	0,689	0,002750	0,577
0,000450	0,771	0,001060	0,687	0,002800	0,574
0,000455	0,770	0,001080	0,685	0,002850	0,572
0,000460	0,769	0,001100	0,683	0,002900	0,570
0,000465	0,768	0,001120	0,681	0,002950	0,568
0,000470	0,767	0,001140	0,679	0,003000	0,566

Tableau des valeurs du rapport $\frac{U}{V}$ *de la vitesse moyenne* U *à la valeur maxima* V *correspondant aux valeurs du rayon moyen* R *comprises entre* $0^m,01$ *et* $6^m,00$.

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{U}{V}$. Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,01	0,745	»	»	»
0,02	0,787	0,740	»	»
0,03	0,805	0,740	»	»
0,04	0,815	0,758	»	»
0,05	0,822	0,770	0,653	»
0,06	0,826	0,779	0,670	»
0,07	0,830	0,786	0,683	»
0,08	0,833	0,791	0,694	»
0,09	0,835	0,795	0,703	»
0,10	0,836	0,799	0,711	0,537
0,11	0,838	0,802	0,718	0,548
0,12	0,839	0,805	0,724	0,558
0,13	0,840	0,807	0,729	0,567
0,14	0,841	0,809	0,734	0,575
0,15	0,842	0,811	0,738	0,583
0,16	0,843	0,812	0,742	0,590
0,17	0,843	0,814	0,746	0,596
0,18	0,844	0,815	0,749	0,602
0,19	0,844	0,816	0,752	0,608
0,20	0,845	0,817	0,755	0,613
0,21	0,845	0,818	0,757	0,618
0,22	0,845	0,819	0,759	0,623
0,23	0,846	0,819	0,761	0,627
0,24	0,846	0,820	0,763	0,631
0,25	0,846	0,821	0,765	0,635
0,26	0,847	0,822	0,767	0,639
0,27	0,847	0,822	0,769	0,643
0,28	0,847	0,823	0,770	0,646
0,29	0,847	0,823	0,772	0,649
0,30	0,848	0,824	0,773	0,653
0,31	0,848	0,824	0,774	0,655
0,32	0,848	0,824	0,776	0,658
0,33	0,848	0,825	0,777	0,661
0,34	0,848	0,825	0,778	0,664
0,35	0,848	0,825	0,779	0,666
0,36	0,849	0,826	0,780	0,669
0,37	0,849	0,826	0,781	0,671
0,38	0,849	0,826	0,782	0,673
0,39	0,849	0,827	0,783	0,676
0,40	0,849	0,827	0,783	0,678
0,41	0,849	0,827	0,784	0,680
0,42	0,849	0,827	0,785	0,682
0,43	0,849	0,828	0,786	0,684
0,44	0,849	0,828	0,786	0,685
0,45	0,850	0,828	0,787	0,687
0,46	0,850	0,828	0,788	0,689
0,47	0,850	0,829	0,788	0,690
0,48	0,850	0,829	0,789	0,692
0,49	0,850	0,829	0,790	0,694
0,50	0,850	0,829	0,790	0,695
0,52	0,850	0,829	0,791	0,698
0,54	0,850	0,830	0,792	0,701
0,56	0,850	0,830	0,793	0,704
0,58	0,850	0,830	0,794	0,706
0,60	0,851	0,831	0,795	0,709

VALEURS de R.	VALEURS DE $\frac{U}{V}$. Parois très-unies.	Parois unies.	Parois peu unies.	Parois en terre.
0,62	0,851	0,831	0,796	0,711
0,64	0,851	0,831	0,796	0,713
0,66	0,851	0,831	0,797	0,715
0,68	0,851	0,831	0,798	0,717
0,70	0,851	0,832	0,798	0,719
0,72	0,851	0,832	0,799	0,721
0,74	0,851	0,832	0,799	0,723
0,76	0,851	0,832	0,800	0,724
0,78	0,851	0,832	0,800	0,726
0,80	0,851	0,832	0,801	0,727
0,82	0,851	0,833	0,801	0,729
0,84	0,851	0,833	0,802	0,730
0,86	0,851	0,833	0,802	0,732
0,88	0,852	0,833	0,803	0,733
0,90	0,852	0,833	0,803	0,734
0,92	0,852	0,833	0,803	0,735
0,94	0,852	0,833	0,804	0,737
0,96	0,852	0,833	0,804	0,738
0,98	0,852	0,834	0,804	0,739
1,00	0,852	0,834	0,805	0,740
1,05	0,852	0,834	0,806	0,743
1,10	0,852	0,834	0,806	0,745
1,15	0,852	0,834	0,807	0,747
1,20	0,852	0,834	0,807	0,749
1,25	0,852	0,835	0,808	0,751
1,30	0,852	0,835	0,809	0,753
1,35	0,852	0,835	0,809	0,755
1,40	0,852	0,835	0,809	0,756
1,45	0,852	0,835	0,810	0,758
1,50	0,852	0,835	0,810	0,759
1,55	0,852	0,835	0,811	0,760
1,60	0,852	0,835	0,811	0,762
1,65	0,853	0,835	0,811	0,763
1,70	0,853	0,835	0,811	0,764
1,75	0,853	0,836	0,812	0,765
1,80	0,853	0,836	0,812	0,766
1,85	0,853	0,836	0,812	0,767
1,90	0,853	0,836	0,813	0,768
1,95	0,853	0,836	0,813	0,769
2,00	0,853	0,836	0,813	0,770
2,20	0,853	0,836	0,814	0,773
2,40	0,853	0,836	0,814	0,776
2,60	0,853	0,836	0,815	0,778
2,80	0,853	0,837	0,815	0,780
3,00	0,853	0,837	0,816	0,782
3,20	0,853	0,837	0,816	0,784
3,40	0,853	0,837	0,816	0,785
3,60	0,853	0,837	0,817	0,786
3,80	0,853	0,837	0,817	0,787
4,00	0,853	0,837	0,817	0,788
4,50	0,853	0,837	0,818	0,791
5,00	0,853	0,837	0,818	0,792
5,50	0,853	0,837	0,818	0,794
6,00	0,853	0,837	0,819	0,795

Répartition des vitesses dans la section d'un canal. — La répartition des vitesses est fort irrégulière et ne présente pas de loi fixe; contrairement à l'opinion généralement admise, la vitesse maxima se trouve au-dessous de la surface libre et la résistance de l'air paraît avoir une influence notable.

Les expériences de MM. Darcy et Bazin portèrent d'abord sur des canaux en bois bien calfatés; avec le tube jaugeur, ils cherchèrent la vitesse dans toutes les parties de la section.

La figure 1 de la planche A représente les courbes d'égale vitesse dans un canal rectangulaire plein et fermé de toutes parts, c'est-à-dire dans un tuyau à section rectangulaire. « Ces courbes d'égale vitesse sont extrêmement régulières et diffèrent très-peu de rectangles dont les côtés seraient parallèles aux parois du tuyau. Ces rectangles sont loin d'être géométriquement semblables et s'aplatissent à mesure que l'on se rapproche de l'axe. Les courbes d'égale vitesse tendent évidemment à reproduire la forme même des parois : on voit de plus qu'elles en suivent les contours en conservant à peu de chose près leurs distances respectives.

Supposez maintenant que, dans le même canal rectangulaire dont on a enlevé le couvercle, on fasse passer un courant dont la surface atteigne juste le milieu du tuyau rectangulaire de tout à l'heure, ce qui, théoriquement, revient à scier ce tuyau en deux parties égales par un plan horizontal, les molécules liquides situées de chaque côté de ce plan de séparation ont exactement même vitesse, et, par suite, n'exercent les unes sur les autres aucune espèce de résistance; si la résistance de l'air n'était pas sensible, le canal à demi-plein d'eau s'écoulant à l'air libre aurait, toutes choses égales d'ailleurs, un débit précisément égal à la moitié du débit du tuyau rectangulaire.

C'est la première vérification qu'il s'agissait de faire : l'expérience a montré que le débit du canal était supérieur à la moitié du débit du tuyau de section double; mais la différence était très-faible, et, en somme, l'expérience n'avait rien de concluant.

Là où la différence est bien sensible, c'est dans la répartition des vitesses, ainsi qu'on le reconnaît à l'inspection des figures 2, 3 et 4, planche A. Dans le cas de l'écoulement à l'air, les courbes d'égale vitesse se rapprochent davantage de la forme elliptique; elles ne rencontrent plus la surface du courant à angle droit, mais la coupent sous un angle aigu et sont plus éloignées de l'axe. La vitesse maxima est au-dessous de la surface.

Mais, évidemment, la différence de répartition des vitesses entre le tuyau fermé et le canal ouvert tient bien moins à la résistance de l'air qu'à la suppression de la paroi supérieure; l'adhérence et le frottement contre cette paroi se trouvent supprimés, il n'y a plus symétrie entre les diverses forces retardatrices, et des mouvements irréguliers se produisent aux abords de la surface libre.

Les figures 1 à 6 de la planche A reproduisent quelques-unes des courbes représentatives des vitesses que M. Bazin a données dans son ouvrage. Sur ces figures, on a tracé les courbes d'égale vitesse : l'une est d'un trait plus gros, c'est celle qui correspond à la vitesse moyenne; les autres courbes correspondent aux vitesses respectivement égales aux fractions 0,7, 0,8, 0,9, 1,1, 1,2, 1,3, de la vitesse moyenne.

Comme forme générale, les courbes d'égale vitesse ont à peu près celle de la section qui les renferme; cela est vrai surtout pour les courbes voisines des parois. Les courbes voisines du fond ne viennent pas toujours jusqu'à la surface et coupent les parois latérales.

Les courbes voisines de la surface ne la rencontrent pas normalement, mais la coupent sous un angle aigu et tendent à se fermer. Quelquefois même elles se ferment, comme on le voit sur quelques-uns des exemples reproduits, et le maximum des vitesses se trouve à la partie centrale de ces courbes fermées.

« Cette tendance paraît d'autant plus prononcée, toutes circonstances égales d'ailleurs, que les vitesses sont moindres. Elle augmente à mesure que la résistance à la paroi augmente, c'est-à-dire à mesure que les vitesses diminuent. »

« Donc, dans l'écoulement à ciel ouvert, des perturbations considérables se produisent aux environs de la surface du courant. Ces perturbations, qui paraissent être d'autant plus considérables que les vitesses sont moindres, font descendre le maximum de vitesse à une grande profondeur, et modifient complétement la figure des courbes qui viennent couper très-obliquement la surface. En présence de ces perturbations, il n'est guère permis d'espérer que l'on puisse parvenir à des formules précises donnant la vitesse en chaque point, en fonction de la vitesse moyenne et des deux coordonnées qui déterminent la position de ce point. »

PROBLÈMES RELATIFS AU MOUVEMENT UNIFORME DANS LES CANAUX.

Dans la pratique, les canaux sont généralement à section de trapèze; on trouvera dans le recueil de Genieys une table permettant de calculer la section et le périmètre mouillé en fonction de la largeur au fond, de l'inclinaison des talus et de la hauteur de l'eau. Cette table est peu utile, et nous croyons suffisant de donner ici quelques renseignements sur les vitesses de fond pour lesquelles les divers terrains sont entraînés ou entamés.

VITESSES DE FOND SOUS LESQUELLES COMMENCENT A ÊTRE ENTRAINÉS LES TERRAINS DANS LESQUELS LES CANAUX SONT ÉTABLIS.

Argile brune propre à la poterie	0m,08
Gros sable jaune	0m,22
Gravier de la Seine, gros comme un grain d'anis	0m,11
— gros comme un pois au plus	0m,19
— gros comme une fève de marais	0m,35
Galets de mer arrondis de 0m,027 de diamètre	0m,65
Pierres à fusil anguleuses de la grosseur d'un œuf de poule	0m,98

VITESSES DE FOND SOUS LESQUELLES COMMENCENT A ÊTRE AFFOUILLÉS LES TERRAINS DANS LESQUELS LES CANAUX SONT ÉTABLIS.

Terres détrempées brunes	0m,07
Argiles tendres	0m,15
Sables	0m,30
Gravier	0m,61
Cailloux	0m,62
Pierres cassées, silex	1m,22
Cailloux agglomérés, schistes tendres	1m,52
Roches en couches	1m,83
Roches dures	3m,05

Parmi les problèmes relatifs au mouvement uniforme de l'eau dans les ca-

naux, il en est qui se présentent fréquemment dans la pratique et que nous allons traiter.

Premier problème. — On donne la coupe transversale d'un lit prismatique à pente constante, on donne en outre la pente et la dépense, et on demande de trouver la hauteur à laquelle l'eau s'élèvera dans chaque section, lorsque le mouvement uniforme sera établi.

Considérons d'abord un canal à section trapèze; désignons par l la largeur au fond, par α la tangente trigonométrique de l'angle du talus avec la verticale, et par h la profondeur de l'eau.

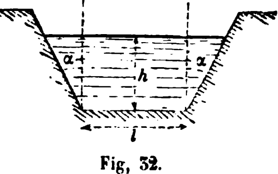


Fig. 32.

Supposons connue cette profondeur h, la surface Ω de l'écoulement sera égale à

$$lh+h^2 \operatorname{tang} \alpha.$$

et le périmètre mouillé χ sera égal à

$$l+\frac{2h}{\cos \alpha}.$$

Le rayon moyen $\left(R=\frac{\Omega}{\chi}\right)$ est donc connu; la vitesse moyenne U est égale au quotient $\left(\frac{Q}{\Omega}\right)$; la pente est donnée; on a donc tous les éléments de l'équation

$$(1) \qquad \frac{RI}{U^2}=A$$

le nombre A se trouve dans les tables de M. Bazin.

On voit si cette équation est vérifiée; si elle ne l'est pas, c'est que la valeur supposée de h n'est pas celle qui convient; on recommence alors un nouvel essai, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'équation (1) se transforme en identité.

Exemple numérique. — Soit un canal à section trapèze, dont la largeur au plafond est de 1 mètre et dont les talus sont inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur; les parois de ce canal sont en terre; sa pente est de $0^m,002$ par mètre, il doit débiter 800 litres ou $0^m,800$ à la seconde; à quelle hauteur l'eau s'y élèvera-t-elle lorsque le mouvement uniforme se sera établi?

$$l=1^m. \qquad \operatorname{tang} \alpha=\frac{3}{2}.$$

Opérons par le tâtonnement, et supposons que la hauteur h sera égale 1 mètre; on aura

$$\Omega=lh+h^2 \operatorname{tang} \alpha=1+\frac{3}{2}=\frac{5}{2}$$

$$\chi=l+\frac{2h}{\cos \alpha}=l+2h\sqrt{1+\operatorname{tang}^2 \alpha}=1+2\sqrt{1+\frac{9}{4}}=1+\sqrt{13}=1+3,605=4,605.$$

$$R=\frac{\Omega}{\chi}=\frac{\left(\frac{5}{2}\right)}{4,605}=\frac{2,5}{4,605}=0,54$$

Cherchons dans les tables de M. Bazin la valeur de A ou $\frac{RI}{U^2}$ correspondant à la valeur précédente de R, nous trouvons

$$A = 0,000928 = \frac{RI}{U^2}.$$

La vitesse moyenne $$U = \frac{Q}{\Omega} = \frac{0^m,800}{\frac{5}{2}} = \frac{1,60}{5} = 0,32;$$

en substituant dans l'expression $\frac{RI}{U^2}$ les nombres précédents, on trouve $A = 0,010$, ce qui est beaucoup trop élevé; le rayon moyen R est trop fort, et la vitesse V trop faible.

Faisons donc un autre essai en prenant pour (h) la valeur $0^m,50$ ou $\frac{1}{2}$, nous trouverons

$$l = 1^m \quad \text{tang}\,\alpha = \frac{3}{2} \quad \Omega = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{3}{2} = \frac{7}{8}$$

$$\chi = 1 + 2.\frac{1}{2}\sqrt{\frac{13}{4}} = 1 + \frac{1}{2} \cdot 3,605 = 2^m,8. \qquad R = \frac{\left(\frac{7}{8}\right)}{2,8} = 0,31$$

$$U = \frac{Q}{\Omega} = \frac{0,8}{\frac{7}{8}} = \frac{6,4}{7} = 0,91.$$

Il en résulte pour $\frac{RI}{U^2}$ la valeur 0,00075, tandis que la table de M. Bazin donne en regard de $R = 0,31$ le nombre 0,001409 pour valeur de A.

Ce résultat nous montre que la hauteur h doit être supérieure à 0,50 et inférieure à 1 mètre.

En essayant $h = 0,60$, nous trouvons pour $\frac{RI}{U^2}$ la valeur 0,00146, tandis que, d'après les tables, cette quantité devrait être égale à 0,001252.

Enfin, en essayant $h = 0^m,58$, nous trouvons pour $\frac{RI}{U^2}$ la valeur 0,00126, tandis que, d'après les tables, cette quantité devrait être égale à 0,00128.

La hauteur d'eau dans le canal sera donc de $0^m,58$, et la vitesse moyenne atteindra $0^m,74$.

La forme de ce canal ne serait point pratique ; il aurait trop de largeur pour la profondeur d'eau. On pourrait donc soit diminuer la pente, soit diminuer la largeur de la section ; il faudrait tenir compte aussi de la valeur élevée de la vitesse et s'assurer que les parois en terre n'auraient point de détériorations à subir. Si l'on ne pouvait conserver les parois en terre, il faudrait recommencer le calcul en supposant l'existence de parois en maçonnerie.

Solution directe. — On pourrait à la rigueur obtenir une solution directe. En effet, prenons h comme inconnue, nous avons

$$\Omega = lh + h^2 \,\text{tang}\,\alpha \qquad \chi = l + 2h\sqrt{1 + \text{tang}^2\alpha},$$

$$R = \frac{lh + h^2 \,\text{tang}\,\alpha}{+ 2h\sqrt{1 + \text{tang}^2\alpha}} \qquad U = \frac{Q}{\Omega} = \frac{Q}{lh + h^2 \,\text{tang}\,\alpha};$$

d'autre part, dans le cas des parois en terre, nous avons, d'après M. Bazin,

$$(1)\quad \frac{RI}{U^2} = 0{,}00028\left(1 + \frac{1{,}25}{R}\right).$$

remplaçant les quantités R, I, U, par leurs valeurs en fonction de h, nous arrivons à une équation du sixième degré qui ne renferme plus que h comme inconnue, et que l'on peut résoudre par tâtonnement. La première méthode est moins sujette à erreur.

Simplification des formules dans le cas d'un lit très-large. — Considérons un lit très-large à fond plat avec berges à inclinaison rapide, le périmètre mouillé varie peu avec la hauteur h, et reste sensiblement égal à la largeur l du cours d'eau; la surface d'écoulement est toujours égale à lh. On a donc

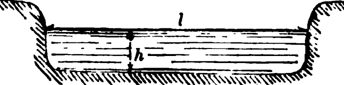


Fig. 33.

$$\Omega = lh \qquad \chi = l \qquad R = h \qquad U = \frac{Q}{lh},$$

et, s'il s'agit de parois en terre, comme on doit appliquer la formule (1) ci-dessus reproduite, on arrive, pour déterminer h à l'équation,

$$\frac{h.I.l^2.h^2}{Q^2} = 0{,}00028\left(1 + \frac{1{,}25}{h}\right)$$

qui devient

$$l^2Ih^4 - 0{,}00028.h.Q^2 - 0{,}00028.1{,}25.Q^2 = 0.$$

Cette équation est du quatrième degré en h.

Généralement, on pourra se donner la valeur de R ou de h d'une manière approximative; on trouvera dans les tables la valeur numérique A du second membre de l'équation (1), et il restera

$$\frac{l^2Ih^3}{Q^2} = A \quad \text{ou} \quad \left(h = \sqrt[3]{\frac{AQ^2}{l^2I}}\right)$$

Cette méthode approximative est permise pour les grands cours d'eau, car nous savons que les valeurs de A restent sensiblement constantes lorsque le rayon moyen R atteint une valeur un peu considérable.

Deuxième problème. — On connaît la coupe transversale d'un lit prismatique, ainsi que la pente de ce lit; on connaît en outre la ligne d'eau, trouver la dépense.

Des données du problème on déduit immédiatement la surface Ω, le périmètre mouillé χ, le rayon moyen R, et, par suite, les tables de M. Bazin donnent la valeur A de $\frac{RI}{U^2}$; on a donc une équation où la vitesse U est seule inconnue; on la calcule, et en la multipliant par la section on a le débit.

Exemple numérique. — Soit le canal à section trapèze de l'exemple précédent, ayant 1 mètre de largeur au plafond avec parois en terre et talus inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur; la ligne d'eau y est à 1 mètre au-dessus du plafond, et

la pente est de 0,0005 ; on demande le débit du canal.

$$\Omega = lh + h^2 \operatorname{tang} \alpha = 1 + \frac{3}{2} = \frac{5}{2},$$
$$\chi = l + 2h\sqrt{1 + \operatorname{tang}^2 \alpha} = 1 + 3{,}605 = 4{,}605,$$
$$R = 0{,}54$$

La table de la page 67 fournit pour A la valeur 0,000928. On a donc l'équation

$$\frac{RI}{U^2} = 0{,}000928 = \frac{0{,}54 \times 0{,}0005}{U^2},$$

qui donne : $U = 0^m{,}538.$

et $Q = 0{,}538 \times 2{,}5 = 1{,}345.$

Le débit est donc de 1,345 litres à la seconde.

Troisième problème. — On a un canal de section donnée devant débiter un volume connu, quelle pente faut-il lui donner?

On connaît la section d'écoulement Ω, le périmètre mouillé χ, le rayon moyen R et la vitesse moyenne U, puisque c'est le quotient du débit par la section d'écoulement.

Les tables de M. Bazin donnent la valeur de A correspondant à la valeur connue de R ; on n'a donc dans l'équation

$$\frac{RI}{U^2} = A$$

qu'une inconnue, la pente, qu'il est facile de calculer.

Exemple numérique. — Un canal avec parois en terre, ayant 1 mètre de largeur au plafond avec des talus inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur, doit débiter 1,345 litres à la seconde, la ligne d'eau étant à 1 mètre au-dessus du fond, quelle est la pente de ce canal?

La section est égale à.	$2^m{,}5$
Le périmètre mouillé est égal à.	$4^m{,}605$
Le rayon moyen R à.	$0^m{,}54$
La vitesse moyenne U est égale à.	$\frac{1{,}345}{2{,}5} = 0{,}538$
D'après les tables numériques, la valeur de A est de. . . .	0,000928

Il en résulte l'équation

$$\frac{RI}{U^2} = A = \frac{0{,}54 . I}{0{,}538^2} = 0{,}000928$$

qui donne pour valeur de la pente le nombre 0,0005.

Quatrième problème. — *On connaît la pente uniforme* I *d'un canal et le volume* Q *que ce canal doit débiter à la seconde, on demande de calculer la section.*

Le problème est évidemment indéterminé, tant qu'on ne connaît point la forme de la section :

1° Supposons une section trapèze, figure 32 :

La surface d'écoulement $\Omega = lh + h^2 \operatorname{tang} \alpha,$

Le périmètre mouillé. . $\chi = l + 2h\sqrt{1 + \operatorname{tang}^2 \alpha}.$

Suivant la nature des parois du canal, on applique l'une ou l'autre des quatre formules de M. Bazin; d'une manière générale, on a :

$$\frac{RI}{U^2}=\alpha+\frac{\beta}{R}$$

$$R=\frac{\Omega}{\chi} \qquad U=\frac{Q}{\Omega}, \quad \text{, d'où} \quad I\frac{\Omega^3}{Q^2\chi}=\alpha+\frac{\beta\chi}{\Omega}.$$

Introduisant dans cette équation les valeurs précédentes de la surface et du périmètre prises en fonction de l, de h et de *tang*α, nous aurons une équation finale renfermant trois inconnues. Or, suivant la nature des parois, *tang*α se trouve déterminé ; on peut se donner l ou h et l'équation ne renferme plus comme inconnue que h ou l ; mais il est assez difficile de la résoudre, car elle est d'un degré supérieur au troisième.

Ainsi, supposons *tang*$\alpha = 1, h = 1$ et cherchons à déterminer l, nous aurons :

$$\Omega=l+1, \quad \chi=l+2\sqrt{2}, \quad R=\frac{l+1}{l+2\sqrt{2}} \quad U=\frac{Q}{l+1}$$

et l'équation de la résistance, en supposant qu'il s'agisse de parois en terre, s'écrira

$$\frac{RI}{U^2}=0{,}00028\left(1+\frac{1{,}25}{R}\right) \quad \text{ou (1)} \quad \frac{I(l+1)^3}{Q^2(l+2\sqrt{2})}=0{,}00028\left(1+\frac{1{,}25(l+2\sqrt{2})}{l+1}\right)$$

équation du quatrième degré que l'on pourra résoudre par tâtonnement.

Généralement, on pourra se rendre un compte à peu près exact de la forme et de la grandeur de la section, on connaîtra donc la valeur A du second membre de l'équation (1) et par suite, cette équation ne sera plus que du troisième degré en l; on pourra donc la résoudre et calculer la valeur de l. On modifiera la section d'après le résultat déjà trouvé, et on obtiendra une seconde valeur de R et par suite de A ; on pourra donc écrire une nouvelle équation (1) qui donnera une valeur plus approchée de l, qui donnera elle-même une valeur plus approchée de R. On arrivera ainsi, après quelques tâtonnements, à obtenir un résultat exact.

Si la valeur de l ne paraît point convenable eu égard à la valeur de h, on modifiera celle-ci et on recommencera le calcul pour trouver la nouvelle valeur de l.

On voit que ces calculs peuvent être assez longs, mais n'offrent pas en somme de difficulté sérieuse.

2° Si la section d'écoulement est une demi-circonférence dont le diamètre D correspond à la ligne d'eau, on a :

$$\Omega=\frac{\pi . D^2}{8} \qquad \chi=\frac{\pi . D}{2} \qquad R=\frac{D}{4}$$

Dans une première approximation, servons-nous de l'ancienne formule des ingénieurs italiens :

$$U=50\sqrt{RI} \qquad U^2=2500.RI \qquad \frac{Q^2}{2500}=\frac{\Omega^3}{\chi}I.$$

qui devient, en exprimant en fonction de D la surface et le périmètre,

$$(2) \quad \frac{\pi^2 D^5}{64}=\frac{Q^2}{625}$$

Cette équation est calculable par logarithmes et donne immédiatement la valeur de D.

Connaissant D, on sait que le rayon moyen de la section en est le quart ; on connaîtra donc ce rayon moyen et les tables de M. Bazin donnent la valeur correspondante de A.

On posera de nouveau l'équation

$$\frac{RI}{U^2} = A$$

et on calculera une valeur plus approchée du diamètre ; après deux ou trois essais de ce genre, on connaîtra la valeur exacte du diamètre.

Le calcul précédent peut servir même au cas de la section trapèze ; on commence par supposer que la section est circulaire et on en déduit, comme nous venons de le faire, le rayon moyen ; on suppose que ce rayon moyen restera le même dans la section trapèze, et on en introduit la valeur dans la formule fondamentale ; cela permet de calculer avec une première approximation soit l, soit h, et par suite la section du trapèze ; on en déduit une nouvelle valeur du rayon moyen avec laquelle on recommence le calcul.

De la sorte, quelques essais suffisent pour conduire au résultat définitif.

3° *Section minima.* — Il importe de réduire autant que possible la section afin que le cube des terrassements soit minimum.

Si l'on considère toutes les surfaces de même aire terminées à une même horizontale, c'est le demi-cercle qui a le périmètre minimum et le rayon moyen maximum.

Lorsque le canal doit avoir des parois maçonnées, il faut donc adopter la forme circulaire, c'est ce qu'on a le soin de faire pour les sections d'égout.

Quand la nature des parois ne permet pas de faire une cuvette circulaire, on doit chercher à se rapprocher le plus possible de cette forme, en adoptant un polygone circonscrit au cercle ayant pour diamètre la ligne d'eau.

Ainsi, on projette par exemple un canal à section trapèze et on connaît d'après la nature des parois, l'inclinaison des talus ; on construira une demi-circonférence quelconque, ayant son diamètre horizontal, on lui mènera latéralement deux tangentes parallèles aux lignes des talus, on construira en outre la tangente horizontale.

Le trapèze cherché pour la section du canal devra être semblable au trapèze formé avec les trois tangentes que nous venons de tracer.

DEUXIÈME PARTIE

MOUVEMENT VARIÉ DANS LES CANAUX

C'est à M. Belanger, ingénieur en chef des ponts et chaussées, que l'on doit la première étude des problèmes relatifs au mouvement permanent varié dans les canaux découverts.

Dans son essai, publié en 1828, il présente les considérations suivantes :

Imaginons un canal d'une longueur quelconque dont les parois sont immobiles et inaltérables par le courant qui pourra s'y établir ; supposons que sa pente

et son profil transversal varient suivant une loi quelconque, pourvu qu'il n'en résulte pas, dans les parois, des changements brusques de direction qui puissent occasionner des tournoiements ou des ondulations dans l'eau qui y coulera; concevons enfin qu'un tel canal soit alimenté à l'une de ses extrémités par une source d'un produit constant, et offre à l'autre bout un mode fixe d'évacuation, par exemple, une embouchure dans un bassin d'un niveau invariable, ou un déversoir de superficie, ou bien encore une cataracte de fond entièrement libre du côté d'aval. Après un certain laps de temps, à compter de l'instant de la première introduction de l'eau dans le canal, il s'établira dans toute son étendue un courant dont chaque section transversale dépensera, par seconde, précisément la même quantité d'eau que fournit la source. Dès lors, la surface du cours d'eau conservera une position invariable, de manière qu'à quelque instant que l'on prenne une section du courant, par un même plan fixe quelconque, cette section sera toujours la même. Cet état du cours d'eau s'appelle, en général, *régime permanent* et il importe de ne pas le confondre avec le *régime uniforme* qui n'en est qu'un cas particulier.

En effet, le *régime permanent* a pour seule condition que le courant soit décomposable en filets fluides invariables de forme et de position, dépensant un volume d'eau constant pendant l'unité de temps, mais dont la section et par conséquent la vitesse peuvent être variables d'un point à un autre d'un même filet. Or, cette dernière circonstance distingue le régime simplement *permanent* du régime *uniforme*, où la section et la vitesse de chaque filet en particulier est constante entre les limites considérées.

On conçoit aisément que la nature présente de fréquents exemples du régime sensiblement permanent des eaux. Il suffit pour cela qu'une source, d'un produit variant très-peu par rapport au temps, coule dans un lit de forme à peu près invariable. L'action toujours égale de la gravité expliquerait seule dans ce cas la permanence du régime. Mais, pour rendre compte de l'uniformité du mouvement des eaux, telle que la nature nous l'offre quelquefois et que l'art la réalise souvent, il faut avoir recours à d'autres causes ; ce sont : d'abord la résistance ou l'espèce de frottement que les parois du lit du courant offrent à son écoulement, et en second lieu la viscosité de l'eau qui fait que cette résistance se transmet de proche en proche aux filets intérieurs du liquide. L'expérience a prouvé l'existence de ces causes de retard dans les cours d'eau et, en partant de cette donnée, l'analyse des forces qui agissent sur une masse fluide en mouvement a prouvé que, pour faire couler un certain volume d'eau constant par seconde, avec une section de grandeur et de figure données et constantes, il faut que le canal ait une certaine pente uniforme.

Cela posé, admettons que le canal considéré soit de la forme la plus favorable que nous puissions imaginer à l'uniformité du mouvement ; ainsi, son lit présentera une surface prismatique ou cylindrique à base quelconque, ou, en d'autres termes, son profil et sa pente seront partout les mêmes, et sa direction sera rectiligne. Il est facile de voir que ces conditions ne seront pas suffisantes pour que le régime permanent du courant soit uniforme ; car cette uniformité ne peut avoir lieu, à moins que la surface de l'eau ne prenne exactement la même pente que le fond du canal. Or, cela est quelquefois impossible ; par exemple, lorsque le fond est horizontal, ou que sa déclivité est en sens contraire du courant.

Il y a plus : lorsque cette déclivité sera dans le sens du courant, sa valeur étant connue, ainsi que la forme du lit et le volume d'eau à dépenser, les for-

mules relatives au mouvement uniforme et précédemment exposées font connaître quelle est la hauteur à laquelle l'eau doit s'élever au-dessus du fond pour que le régime uniforme ait lieu ; et, par conséquent, si l'on parvient à maintenir cette hauteur d'eau à l'aval du canal, par un déversoir ou par tout autre moyen, le régime uniforme s'établira dans toute la longueur du courant, sauf le voisinage immédiat de la source. Mais si, au contraire, le mode d'écoulement des eaux à l'issue du canal ne les tient pas exactement à la hauteur du régime uniforme, ce régime n'existera pas. La surface des eaux est-elle soutenue quelque part à une hauteur plus grande que celle qu'indique la formule, la masse fluide se gonflera et diminuera sa vitesse, généralement par degrés insensibles, en venant de la source vers ce point ; au contraire, les eaux, vers leur sortie du canal, se précipitent-elles en cataracte, ou, en général, se tiennent-elles au-dessus du fond à une hauteur moindre que celle du régime uniforme, le courant se déprimera, s'accélèrera insensiblement en approchant de ce point. Dans les deux cas, il y aura régime permanent, mais non régime uniforme.

C'est ce régime permanent varié que nous nous proposons d'étudier. Malheureusement, la théorie en est très-difficile à établir par l'expérience et peu abordable par le calcul.

ÉQUATION FONDAMENTALE DU MOUVEMENT VARIÉ.

Pour établir l'équation fondamentale du mouvement varié, on fait les hypothèses suivantes, qui, du reste, ne sont pas absolument justifiées:

1° On imagine le courant partagé en tranches infiniment minces par des sections transversales très-rapprochées, lesquelles sont normales à la direction des filets fluides, c'est-à-dire aux vitesses des molécules de la tranche considérée;

2° On suppose que toutes les molécules d'une même tranche ont même vitesse et l'on fait cette vitesse égale à la vitesse moyenne V ; les expériences de M. Bazin nous ont prouvé que cette hypothèse était complétement fausse ;

3° On admet que la courbure du lit est nulle ou peu sensible, de telle sorte qu'on puisse faire abstraction des forces centrifuges;

4° On ne considère que des lits dans lesquels la section varie d'une manière lente et progressive ; la variation des dimensions de profil est donc très-faible en comparaison de la longueur, de sorte qu'on peut considérer à chaque instant la vitesse de chaque molécule comme perpendiculaire à la tranche qu'elle traverse, en négligeant les vitesses transversales qui existent, à la rigueur, dès que la section est variable d'une tranche à l'autre.

Toutes les vitesses étant parallèles dans une tranche donnée, les forces dues à la viscosité ne tendent nulle part à faire dévier les molécules liquides, et, par conséquent, ces forces ont en chaque point même direction que la vitesse ; d'après cela, si l'on se reporte aux observations que nous avons faites au sujet du théorème de Bernouilli, on reconnaît que les pressions varient dans une section transversale suivant la loi hydrostatique, et, comme l'écoulement se fait à l'air libre, le niveau piézométrique se trouve pour tous les points d'une même section à la surface même du courant.

Pour préciser la position des sections, désignons par s la distance où elles se trouvent de l'origine, distance comptée sur l'axe des sections; deux sections voisines ab, cd, sont situées à la distance ds l'une de l'autre, et la différence des

niveaux piézométriques dans ces deux sections est égale à la différence de niveau entre les deux lignes d'eau, soit à la hauteur *ce*, ou simplement à la quantité dy dont la surface du courant s'est abaissée entre les deux sections. Le rapport $\left(\frac{dy}{ds}\right)$ sera la tangente trigonométrique de l'angle *cae*; ce rapport mesure la pente de superficie du courant.

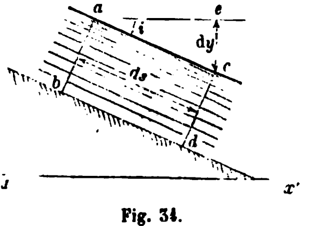


Fig. 34.

Désignons par v la vitesse d'une molécule traversant la section *ab*, cette vitesse deviendra $(v + dv)$ au passage de la section *cd*, et la demi-variation de force vive de la molécule sera représentée par :

$$\frac{m(v+dv)^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = m.vdv.$$

Évaluons maintenant le travail des forces :

Il comprend : 1° le travail de la pesanteur, qui est le produit du poids p ou mg de la molécule par la hauteur de chute dy; 2° le travail des forces retardatrices; soit φ la valeur de la force retardatrice rapportée à l'unité de masse, cette force sera égale à $m.\varphi$ pour la molécule considérée, et son travail aura pour expression $m.\varphi.ds$.

Égalant la demi-variation des forces vives et le travail, il vient :

$$m.v.dv = m.g.dy - m.\varphi.ds$$

ou bien
$$(1) \quad \frac{m.v\,dv}{g} = m.dy - \frac{1}{g}m.\varphi.ds.$$

Faisons la somme des équations analogues pour toutes les molécules comprises entre les deux sections, les quantités dy et ds sont constantes et restent en dehors des signes Σ, de sorte que l'équation générale, résolue par rapport à dy devient :

$$(2) \quad dy = \frac{\Sigma(m.v.dv)}{g.\Sigma m} + \frac{1}{g}ds\frac{\Sigma(m.\varphi)}{\Sigma m}.$$

Le premier terme du second membre se simplifie, puisque nous avons admis que la vitesse était constante en tous les points d'une tranche et égale à la vitesse moyenne U; quant au second terme, les forces φ dues à la viscosité se détruisent, puisque deux filets qui se touchent exercent l'un sur l'autre deux actions égales et directement opposées; il ne reste que les forces retardatrices le long des parois, forces qui, d'après la théorie du mouvement uniforme, page 60, sont égales sur l'unité de surface à $\pi.A.U^2$.

D'après cela :

$\Sigma(m.v.dv)$ est égal à . . . . . $U.dU.\Sigma m$

$\Sigma(m\varphi)$. . . . . $\Pi.\chi.ds.A.U^2$,

$\Sigma(m)$. . . . . $\frac{\Pi}{g}.\Omega.ds$

expressions dans lesquelles les lettres Ω, χ et π représentent toujours la section d'écoulement, le périmètre mouillé et la densité du liquide.

En résumé, le principe du travail nous conduit à l'équation différentielle

$$(3)\qquad dy = \frac{U.dU}{g} + \frac{\chi}{\Omega}.A.U^2.ds. = \frac{U.dU}{g} + \frac{AU^2}{R}.ds$$

Intégrant cette équation entre deux sections, dont une est affectée de l'indice zéro, on trouve :

$$(4)\qquad y = \frac{U^2 - U_0^2}{2g} + \int_0^s \frac{A.U^2}{R} ds.$$

L'équation (3) ou son intégrale l'équation (4) constitue la formule fondamentale du mouvement permanent varié dans les canaux découverts.

Correction de l'équation fondamentale. — L'équation fondamentale (4) est sujette à plusieurs objections. En effet, dit M. Bazin, elle suppose que, dans le mouvement varié, les vitesses se trouvent réparties de la même manière que dans le mouvement uniforme, de telle sorte que la résistance à la paroi ait dans les deux cas la même expression. Cette hypothèse, qui peut être suffisamment exacte lorsque le régime du courant varie avec une grande lenteur, doit certainement conduire, dans beaucoup de cas, à des résultats erronés.

En second lieu, la substitution qu'on a faite de la vitesse moyenne à la vitesse réelle en chaque point a modifié sensiblement le terme qui représente, dans l'équation du travail, la variation de force vive de la masse liquide. Cette variation serait plus forte si l'on avait conservé la valeur réelle des vitesses. Il faut donc affecter le terme $\left(\frac{U.dU}{g}\right)$ de l'équation (3), ou le terme $\left(\frac{U^2 - U_0^2}{2g}\right)$ de l'équation (4) d'un coefficient correctif α.

Plusieurs auteurs, estimant que le nombre (α) est peu supérieur à l'unité, et qu'il s'applique à un terme d'importance secondaire, n'introduisent pas le coefficient α dans la formule et le supposent égal à l'unité.

C'est une faute, et M. Bazin a montré que la valeur de (α) était souvent notablement supérieure à l'unité. Voici le résultat de ses expériences à ce sujet :

FORME ET NATURE DES PAROIS DU CANAL	VALEUR DU COEFFICIENT α (moyenne)
Canaux rectangulaires et trapézoïdaux en planches.	1.05
Canaux en planches recouvertes de liteaux espacés de 0m,01.	1.08
— — — — 0m,05.	1.15
Rigole murée.	1.07
Canal demi-circulaire en ciment pur.	1.025
— — mélangé de sable..	1.04
— — revêtu de petit gravier..	1.09

On voit que le nombre α est supérieur à l'unité et qu'il croît avec la résistance des parois.

On peut l'exprimer d'une manière suffisamment approchée par l'équation :

$$\alpha = 1 + 210.A$$

dans laquelle A conserve sa signification habituelle; c'est la valeur de $\frac{RI}{U^2}$ fournie par les tables.

L'équation fondamentale (3) doit donc être mise sous la forme :

$$(5) \qquad dy = \alpha.\frac{U.dU}{g} + \frac{A.U^2}{R}.ds.$$

PROBLÈMES RELATIFS AU MOUVEMENT VARIÉ.

Les problèmes que nous avons traités dans le cas du mouvement uniforme se présentent de même dans le cas du mouvement permanent varié, mais il n'est guère facile de les résoudre, surtout d'une manière exacte et certaine. Nous indiquerons seulement les trois problèmes suivants :

1er Problème. — *Un cours d'eau, dont le régime est permanent varié, débite un volume* Q *par seconde; on peut lever autant de profils en travers qu'on le veut, et on demande la pente superficielle entre deux sections données.*

La solution est donnée immédiatement par l'équation :

$$5\,(bis) \qquad y = \alpha.\frac{U^2 - U_0^2}{2g} + \int_0^s \left(\frac{AU^2}{R}.ds\right)$$

En effet, on a :

$$Q = U.\Omega = U_0\Omega_0 \ldots\ldots = U_n\Omega_n;$$

le premier terme du second membre est donc facile à calculer, il est égal à :

$$\frac{\alpha}{2g}\left(\frac{Q^2}{\Omega^2} - \frac{Q_0^2}{\Omega_0^2}\right).$$

Le second terme est une intégrale; on commencera par déterminer la valeur de A, eu égard à la nature des parois et à la valeur moyenne du rayon R; la connaissance de A entraîne celle de α.

L'intégrale se met donc sous la forme

$$A\int_0^s \left(\frac{U^2}{R}.ds\right) \quad \text{ou} \quad A.Q^2.\int_0^s \left(\frac{\chi}{\Omega^3}.ds\right);$$

elle ne pourrait être calculée exactement que si on savait comment le périmètre mouillé et la section varient avec s; mais il est toujours possible de la calculer approximativement par la quadrature d'une courbe; en effet, on choisit un certain nombre de sections entre lesquelles il n'existe point de variations brusques, sur un axe horizontal on marque les distances s de ces sections à l'origine du canal, par les points ainsi obtenus, on élève des verticales sur lesquelles on prend à une certaine échelle une longueur égale à $\frac{\chi}{\Omega^3}$, on réunit par une courbe continue les points ainsi obtenus, et l'aire limitée à la courbe, aux deux ordonnées extrêmes et à l'axe des abscisses mesure l'intégrale. Cette aire se calcule par un des procédés connus, et multipliée par $A.Q^2$, elle donne la valeur du second terme de l'équation.

La dénivellation y est donc connue.

Ce calcul, quoique assez long, ne présente aucune difficulté ; nous engageons le lecteur à se donner lui-même un exemple pour faire une application numérique de la formule.

2e Problème. — *On connaît le profil en long et les profils en travers d'un cours d'eau et on demande de calculer le débit* Q.

La solution se trouve encore dans l'équation :

$$y = \alpha . \frac{U^2 - U_0^2}{2g} + \int_0^s \frac{A.U^2}{R} . ds$$

qui peut s'écrire :

$$y = \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{Q^2}{\Omega^2} - \frac{Q_0^2}{\Omega_0^2} \right) + Q^2 \int_0^s \frac{A\chi}{\Omega^3} . ds$$

et qui ne renferme plus que Q comme inconnue.

La valeur de l'intégrale se trouvera, comme tout à l'heure, au moyen d'une quadrature.

En réalité, on n'aura pas recours au calcul pour résoudre les deux problèmes précédents. Si l'on a besoin de trouver la pente entre deux profils donnés, on la cherchera par un nivellement et on sera sûr de l'obtenir exactement, on pourra ensuite la calculer, si l'on veut, et ce sera un moyen de contrôler l'exactitude des formules théoriques.

De même, le débit s'obtient toujours par un calcul direct ; mais rien n'empêche de le calculer et de voir si les formules sont d'accord avec l'expérience; c'est même un moyen d'établir des formules empiriques.

3e Problème. — *On connaît les sections transversales du lit d'un cours d'eau, mais on ne connaît point la position de la ligne d'eau dans ces sections; on connaît le profil en long du fond, la dépense* Q *et la hauteur de l'eau dans une des sections extrêmes, on demande quelle sera la hauteur de l'eau dans l'autre section extrême.*

On ne peut résoudre ce problème que d'une manière approximative et à l'aide d'opérations successives.

Partageons l'espace compris entre la section Ω_0 et la section Ω en un certain nombre d'intervalles, dans chacun desquels il n'existe point de variations brusques et désignons les sections qui terminent ces intervalles par les indices 1, 2, 3.... n.

Cherchons la dénivellation qui se produit entre Ω_0 et Ω_1 ; à cet effet posons l'équation :

$$y_1 = \frac{\alpha Q^2}{2g} \left(\frac{1}{\Omega_1^2} - \frac{1}{\Omega_0^2} \right) + \frac{1}{2} AQ^2 \left(\frac{\chi_1}{\Omega_1^3} + \frac{\chi_0}{\Omega_0^3} \right) \left(\frac{s_1 - s_0}{2} \right)$$

Au lieu de prendre l'intégrale du second terme qui correspondrait réellement à la section moyenne de l'intervalle $\Omega_0 \, \Omega_1$, nous avons pris la moyenne arithmétique entre les résultats qu'on obtient en substituant successivement les dimensions de la première et de la dernière section de l'intervalle considéré.

Cependant, cette équation simplifiée ne nous apprend rien, tant que nous n'avons pas la ligne d'eau de la section Ω_1, et c'est précisément cette ligne d'eau que nous cherchons. On opère alors, comme nous l'avons fait déjà plusieurs fois, par la méthode des approximations successives :

On suppose que la dénivellation y_1 est nulle, cela donne la ligne d'eau de la

seconde section et permet de calculer Ω_1 et χ_1 ; on en porte la valeur dans l'équation précédente et il en résulte une première valeur de y_1, qui permet de calculer de nouvelles valeurs de Ω_1 et χ_1, lesquelles, substituées à leur tour dans l'équation, fournissent une valeur plus approchée de la dénivellation. Après quelques essais, on arrive à une valeur de y_1 sensiblement invariable.

C'est d'elle que l'on part pour calculer la dénivellation y_2 entre les sections Ω_1 et Ω_2. Connaissant y_2, on calcule y_3, et ainsi de suite jusqu'à la section extrême.

La dénivellation totale est la somme des dénivellations élémentaires.

Étude du mouvement varié dans un canal à pente et à profils constants. — Nous appliquerons les formules du mouvement varié aux canaux à pente et à profil constants, car ce sont ceux que l'on rencontre le plus souvent dans la pratique. Même sur une rivière naturelle, on considère en général une assez faible partie de son cours pour pouvoir admettre que la pente et le profil en travers sont sensiblement constants; c'est ce qui arrive par exemple lorsqu'on considère le bief d'une usine.

Comme la théorie n'est pas suffisamment avancée pour conduire à des résultats exacts, il vaut mieux rechercher la simplicité des données que de se lancer dans des calculs compliqués, conduisant à des résultats auxquels on ne peut accorder une absolue confiance. Ainsi, il arrivera souvent que les berges d'un lit seront sensiblement régulières et qu'on pourra, sans grande erreur, admettre pour ce lit une section uniforme, trapèze ou rectangle.

Soit donc un lit à pente i et à section Ω constantes; conservons toujours les mêmes notations, dont il est inutile de redire la signification.

Suivant l'axe longitudinal du lit, faisons une section par un plan vertical ; la ligne de fond est une droite nq faisant avec l'horizontale l'angle dont la tangente trigonométrique est i ; entre les deux sections voisines mn, pq la ligne d'eau ou le profil en long du courant est une ligne qu'on peut confondre avec la droite mp. Par le point m, menons l'horizontale mv et la droite mr parallèle à la ligne de fond; la dénivellation dy entre m et p sera la profondeur du point p au-dessous de l'horizontale mv ; comme l'inclinaison du lit est toujours très-faible, la droite pv diffère infiniment peu de la verticale correspondante et peut être prise égale à dy.

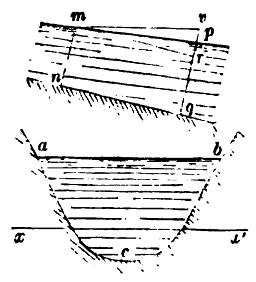


Fig. 35.

D'un autre côté, si on désigne par ds la distance mr des deux sections voisines mn, pq, on aura :

$$vr = mr.\,\text{tang}\,(rmv) = i\,ds$$

La longueur pr est la différence des hauteurs d'eau dans les deux sections voisines, c'est la différentielle dh.

D'où résulte l'équation :

$$pv = vr - pr \qquad (6) \quad dy = i\,ds - dh$$

Le débit Q est constant, et dans une section quelconque, on a toujours :

$$Q = U.\Omega,$$

équation qui donne par différentiation :

$$U.d\Omega + \Omega.dU = o \qquad \text{et} \qquad dU = -\frac{U}{\Omega}.d\Omega$$

Mais, en passant de la section *mn* à la section voisine *pq*, l'accroissement $d\Omega$ de la section est un rectangle qui a pour base *ab* ou *l* et pour hauteur *pr*, ou la différentielle *dh* ; on a donc :

$$d\Omega = l.dh \quad \text{et} \quad (7)\ dU = -\frac{U.l}{\Omega}.dh.$$

Substituant dans l'équation (5) les valeurs de *dy* et de *dU* fournies par les équations (6) et (7), il vient :

$$ids - dh = -\frac{\alpha.U^2.l}{\Omega.g}.dh + \frac{AU^2}{R}.ds,$$

d'où l'on tire : $$(8)\quad ds = \frac{1 - \frac{\alpha.U^2.l}{\Omega.g}}{i - \frac{AU^2}{R}}.dh.$$

Cette formule (8) va nous permettre de construire le profil en long du courant connaissant le lit, la pente, le débit et la hauteur d'eau dans la section à l'origine ; c'est le troisième problème du cas général.

Intégrant l'équation (8) entre les sections Ω_0 et Ω, nous avons :

$$(9)\qquad s - s_0 = \int_{h_0}^{h} \frac{1 - \frac{\alpha.U^2.l}{\Omega\, g}}{i - \frac{A.U^2}{R}}.dh.$$

la section étant connue, on peut exprimer $\Omega R l$ et U en fonction de *h* et intégrer le second membre de l'équation (9) ; on connaît h_0, on se donne une valeur arbitraire de *h*, et on en déduit la valeur numérique de ce second membre ; on connaît par conséquent la distance $(s\text{-}s_0)$, c'est-à-dire la position de la section pour laquelle la hauteur d'eau sera égale à *h*. Il est donc facile de construire le profil en long.

L'intégration n'est pas toujours possible et peut donner lieu à erreur ; il vaut mieux opérer par la quadrature d'une aire courbe, comme nous l'avons indiqué déjà ; on se donne des valeurs successives de *h*, on calcule pour chacune d'elles la valeur numérique du coefficient de *dh* dans l'équation (9), et on prend cette valeur numérique pour ordonnée du point dont l'abscisse est *h*. Réunissant les points ainsi obtenus par un trait continu, on obtiendra une courbe dont l'aire est numériquement égale au second membre de l'équation (9).

Un calcul de ce genre peut être long et exiger de l'attention, mais il n'est point difficile et nous engageons le lecteur à se donner un exemple numérique et à le résoudre.

Remarque. — Si l'on considère la formule (8), on voit que le rapport $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ s'annule lorsque la quantité $i - \frac{AU^2}{R}$ devient nulle c'est-à-dire lorsque $RI = AU^2$. A ce moment l'angle de la ligne d'eau *mp* et de la ligne de fond *nq* est nul ; la surface du courant est parallèle au fond du cours d'eau et le régime uniforme s'établit.

La hauteur correspondante H est celle qui convient au régime uniforme ; et il n'y a pas besoin de pousser plus loin l'intégration.

Ces notions vont s'éclaircir par l'étude de quelques cas particuliers qui seuls se présentent dans la pratique.

Application des formules à une section rectangulaire. — Considérons une section rectangulaire de largeur constante (l); la hauteur variable de l'eau en chaque section est représentée par h et H est la hauteur d'eau qui correspond, pour le débit considéré, au régime uniforme.

Le problème qu'on se propose est de construire le profil en long du cours d'eau, connaissant le débit Q, le lit, la pente et la hauteur d'eau h_0 à l'origine; on admet que c'est à partir de cette origine que l'on compte les longueurs s; donc s_0 est nul.

On a les relations suivantes :

$$U = \frac{Q}{\Omega} = \frac{Q}{lh} \qquad \chi = l + 2h \qquad \Omega = lh \qquad R = \frac{l+2h}{lh}$$

et l'équation différentielle (8) peut s'écrire :

$$(10) \qquad dh = i\,ds.\frac{1 - \dfrac{AU^2}{Ri}}{1 - \dfrac{\alpha U^2}{gh}}$$

Nous allons faire de cette équation une discussion sommaire : on trouvera l'intégration et la discussion complète soit dans l'hydraulique de M. Bresse, soit dans l'ouvrage de Dupuit intitulé : *Étude sur le mouvement des eaux.*

Du reste, la discussion approfondie ne paraît point présenter un intérêt vraiment pratique, car, si nous pouvons exprimer U et R en fonction de la largeur et de la hauteur de la section, il n'en est pas de même de la quantité A qui varie d'un moment à l'autre; nous avons bien vu que, dans le cas du mouvement uniforme, les variations de A étaient données par une expression de la forme $\alpha + \frac{\beta}{R}$; mais, rien ne nous permet de supposer que cette expression est encore applicable au cas du mouvement varié, et, si nous l'adoptons pour faciliter l'intégration de l'équation (10), nous faisons une hypothèse sans fondement.

Lorsque la hauteur h est égale à la hauteur H du régime uniforme, on a : $RI = AU^2$ et le numérateur du second terme de l'équation (10) est nul.

Si $h < H$, la nouvelle vitesse moyenne est supérieure à celle qui correspond au régime uniforme et l'on a $AU^2 > Ri$; donc le numérateur $1 - \frac{AU^2}{Ri}$ est négatif.

Inversement si $h > H$, ce numérateur est positif.

Nous avons donc deux cas à distinguer, suivant que le dénominateur est positif ou négatif.

Premier cas. — La quantité $1 - \frac{\alpha U^2}{gh} > 0$.

C'est ce qui arrive d'ordinaire dans les cours d'eau naturels.

Considérons successivement ce qu'on appelle le remou de gonflement et le remou d'abaissement. Le premier se produit lorsqu'en un point du courant il existe un barrage qui élève les eaux au-dessus de la hauteur convenant au régime uniforme; le second, au contraire, se produit lorsque la portion de cours

d'eau considérée débouche dans une autre portion à pente plus rapide ou s'épanche en cataracte.

1° *Remou de gonflement. — Profondeur* h *supérieure à* H.

L'équation (10) donne pour l'expression de $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ une fraction dont les deux termes sont toujours positifs, et qui tend à s'annuler lorsque h se rapproche de plus en plus de H. Or, la quantité $\left(\frac{dh}{ds}\right)$, voir la figure 35, mesure l'inclinaison de la ligne d'eau par rapport au fond du canal; cette inclinaison est toujours positive; à partir d'une certaine section mn, figure 36, si l'on remonte vers

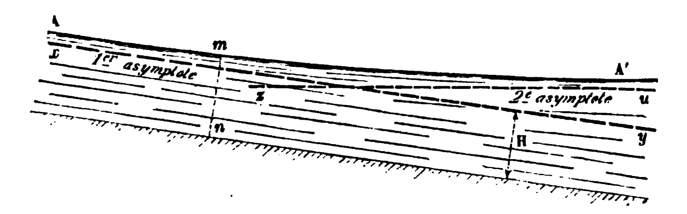


Fig. 36.

l'amont, la courbe a toujours sa concavité vers le haut, mais elle se rapproche de plus en plus de la ligne xy, parallèle au fond et située à une hauteur H au-dessus de ce fond, c'est-à dire de la ligne qui correspond au régime uniforme. Le profil en long de la surface du cours d'eau est donc la courbe mA asymptote de la droite xy; si l'on parcourt la branche d'aval, la profondeur h allant en croissant, et la quantité $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ restant positive, les quantités $\left(\frac{AU^2}{Ri}\right)$ et $\left(\frac{\alpha U^2}{gh}\right)$ diminuent de plus en plus la fraction qui multiplie i tend vers l'unité; donc $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ tend vers i et la courbe mA' est asymptote à l'horizontale zu.

La courbe complète AmA' est analogue à une hyperbole.

2° *Remou d'abaissement. — Profondeur* h *inférieure à* H.

Si l'on donne à la profondeur h des valeurs décroissantes et inférieures à H, la quantité $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ est négative; si l'on descend successivement à partir de la profondeur H, on voit que $\frac{dh}{ds}$ part d'abord de zéro, c'est-à-dire que le profil mA du courant est asymptote à la ligne xy, parallèle au fond et à une hauteur h au-dessus de ce fond; la convexité de la courbe s'accentue à mesure que l'on descend vers l'aval, il arrive un moment où la profondeur atteint une valeur h telle que

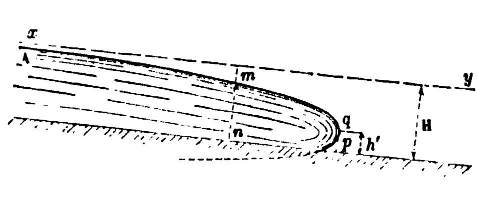


Fig. 37.

$$1-\frac{\alpha U^2}{gh'}=o;$$

à ce moment, la tangente trigonométrique de l'inclinaison de la courbe sur le

fond du canal devient infinie, c'est-à-dire que la courbe est normale au fond.

Ce phénomène se produit, par exemple, au point p pour lequel la profondeur pq est égale à h'.

Si l'on fait décroître h au delà de h', $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ devient positif, la courbe rebrousse comme l'indique la ligne pointillée; ce n'est plus qu'une courbe théorique qui ne saurait se réaliser dans la pratique; la seule branche utile est représentée par qmA, et la branche parasite nous enseigne seulement que, la profondeur h' étant atteinte, le mouvement régulier du courant est devenu impossible, car il est bien évident que l'écoulement ne s'arrête pas. L'hypothèse que nous avons admise du parallélisme des filets entre deux sections voisines n'est pas réalisable; notre point de départ est donc complètement faux et il en est de même des résultats que nous en avons tirés.

Deuxième cas. — La quantité $1 - \frac{\alpha U^2}{gh} < o$.

Généralement, cette relation ne se rencontre pas dans les cours d'eau naturels; elle est tout à fait accidentelle. Comme tout à l'heure, deux combinaisons peuvent se produire : la profondeur h est supérieure ou inférieure à H, il y a remou de gonflement ou remou d'abaissement.

1° *Remou de gonflement* $h > H$.

Considérons la valeur h'' pour laquelle le numérateur $1 - \frac{\alpha U^2}{gh}$ s'annule; par hypothèse cette valeur est supérieure à H; donnons à h des valeurs croissant à partir de h'', les deux termes de la fraction du second membre de l'équation (10) restent toujours de signe contraire; la courbe tourne sa concavité vers le fond, elle part d'une direction normale au fond car, pour $h = h'$, la tangente de l'inclinaison $\left(\frac{dh}{ds}\right)$ devient infinie; lorsque h va sans cesse en croissant au delà de h'', les deux termes de la fraction qui multiplie i tendent vers l'unité, l'inclinaison de la courbe tend donc vers i, c'est-à-dire que cette courbe est asymptote à l'horizontale ux.

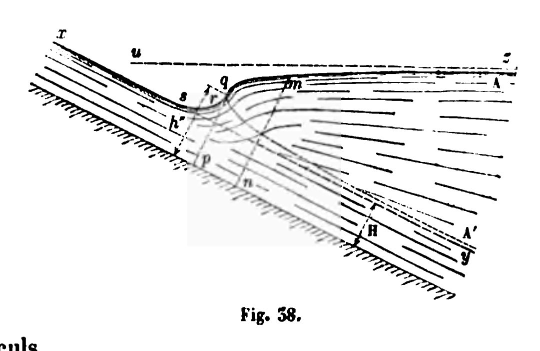


Fig. 38.

On obtient ainsi la branche qmA, qui, évidemment, ne peut se réaliser dans la pratique aux environs du point q, puisqu'elle est en contradiction manifeste avec l'hypothèse du parallélisme des filets liquides entre deux sections voisines, hypothèse qui est la base de nos calculs.

Si l'on considère les valeurs de h inférieures à h'', les deux termes de la fraction du second membre de l'équation (10) sont de même signe, $\frac{dh}{ds}$ est positif et tend vers zéro à mesure que h se rapproche de H; on obtient la branche parasite qA', asymptote à la ligne xy parallèle au fond, cette branche est absolument étrangère à la question.

Ainsi, la courbe du remou de gonflement s'arrête brusquement lorsqu'on se

dirige vers l'amont ; cela veut dire qu'elle se raccorde brusquement avec la ligne xy du mouvement uniforme, et le raccord se fait au moyen d'une courbe telle que $q.r.s.$

2° *Remou d'abaissement* $h < H$.

Les deux termes de la fraction du second membre de l'équation (10) sont de même signe, ce qui indique que h va en croissant avec s, c'est-à-dire que la profondeur croît à mesure que l'on descend le cours d'eau. Ce résultat est en contradiction manifeste avec l'hypothèse d'un remou d'abaissement. La formule ne nous donne donc aucun résultat pratique ; ce qui veut dire que le régime uniforme ne se modifie pas d'une manière graduelle lorsqu'il se manifeste un abaissement de niveau ; la modification est brusque et s'opère par un ressaut.

Un ressaut, c'est-à-dire une dénivellation de la surface répartie sur une longueur relativement faible du courant, est en désaccord absolu avec le point de départ de nos formules qui suppose que le parallélisme des filets liquides existe entre deux sections voisines.

Conclusion. — Les formules précédentes, permettant de calculer le profil en long d'un cours d'eau, ne sont applicables que dans le premier cas, lorsque la quantité $1 - \frac{\alpha U^2}{gh}$ est positive, et, c'est généralement ce qui arrive sur les cours d'eau naturels. Nous donnerons plus loin une application numérique de ces formules.

Circonstances dans lesquelles le ressaut se produit. — Dans le premier et dans le second cas que nous venons d'étudier, nous obtenons pour le profil en long du courant des courbes qui deviennent normales au fond lorsque la quantité $1 - \frac{\alpha U^2}{gh}$ passe du positif au négatif, c'est-à-dire lorsqu'elle s'annule.

Comme nous l'avons dit, ces courbes ne peuvent se réaliser du moins dans le voisinage du point où elles deviennent normales au fond ; elles indiquent seulement que l'hypothèse première est fausse et elles nous apprennent qu'une dénivellation brusque se produit. Cette dénivellation brusque porte le nom de ressaut.

La condition nécessaire et suffisante pour qu'un ressaut se produise est que la quantité

$$1 - \frac{\alpha . U^2}{gh}$$

puisse devenir négative.

Résolvons donc l'inégalité :

$$1 - \frac{\alpha . U^2}{gh} < o.$$

L'équation du mouvement uniforme nous donne :

$$Ri = AU^2 \qquad U^2 = \frac{Ri}{A} = \frac{lh.i}{(l+2h)A},$$

et l'inégalité devient :

$$i > \frac{l+2h}{l\alpha} . g.A.$$

Dans chaque cas particulier on pourra donc calculer, grâce à cette inégalité, la pente au delà de laquelle le ressaut sera possible.

M. Bazin, pour simplifier la formule, considère le cas où le cours d'eau est assez large pour qu'on puisse négliger $2h$ en présence de l, c'est-à-dire que la profondeur est faible relativement à la largeur. De même le nombre α voisin de l'unité peut être négligé.

L'inégalité se réduit alors à

$$i > g_{,}A.$$

Or, nous savons que A peut se mettre sous la forme $m+\frac{n}{R}$, m et n étant des coefficients constants qui dépendent de la nature des parois. On a donc :

$$i > gm\left(1+\frac{n}{m.R}\right)$$

Le courant étant supposé très-large relativement à sa profondeur, le rayon moyen R est sensiblement égal à cette profondeur (h) et l'inégalité précédente devient

$$i > gm\left(1+\frac{n}{mh}\right)$$

M. Bazin a fait rentrer toutes les parois dans quatre catégories pour lesquelles nous avons donné les valeurs de (m) et (n).

Dans chaque catégorie le ressaut sera possible à deux conditions :

1° Une condition générale, indépendante de h, $i > gm$;

2° Et une condition particulière, qui dépend de la profondeur h,

$$h > \frac{n}{m}\cdot\frac{1}{i-gm}$$

C'est d'après ces formules que M. Bazin a pu dresser le tableau suivant :

DÉSIGNATION DES PENTES ET HAUTEURS	1re CATÉGORIE de Parois CIMENT LISSÉ TRÈS-UNI	2e CATÉGORIE de Parois PIERRE DE TAILLE BRIQUES, PLANCHES	3e CATÉGORIE de Parois MAÇONNERIE ORDINAIRE	4e CATÉGORIE de Parois PAROIS EN TERRE
Pente au-dessous de laquelle le ressaut ne peut se produire..	0m,00147	0m,00186	0m,00235	0m,00275
Le ressaut se produira sur une pente de 0m,002 lorsque la profondeur dépassera. . . .	0m,08	»	»	»
Le ressaut se produira sur une pente de 0m,003 lorsque la profondeur dépassera.	0m,03	0m,12	»	»
Le ressaut se produira sur une pente de 0m,004 lorsque la profondeur dépassera. . . .	0m,02	0m,06	0m,36	»
Le ressaut se produira sur une pente de 0m,006.	»	0m,03	0m,16	1m,06
Le ressaut se produira sur une pente de 0m,010.	»	»	0m,08	0m,47
Le ressaut se produira sur une pente de 0m,015.	»	»	»	0m,28

M. l'ingénieur Vauthier, qui avait étudié la question des remous, pensait que tous les remous pouvaient se terminer par un ressaut :

On voit qu'une pareille idée est très-loin de la vérité. Au contraire, les ressauts ne pourront guère se produire que dans des rigoles d'expérience auxquelles on donnera une pente notable. On ne les verra jamais sur une rigole en terre ou même en maçonnerie, car il faudrait que ces rigoles possédassent une pente dangereuse pour la stabilité de leurs parois.

APPLICATIONS NUMÉRIQUES DES FORMULES DU MOUVEMENT VARIÉ.

PREMIÈRE APPLICATION. — *Dans un canal à section rectangulaire de 2 mètres de large, construit avec parois en maçonnerie ordinaire et possédant une pente de fond de 0m,001, s'écoule un volume d'eau égal à 1,000 litres par seconde, on établit en un point du courant un barrage de 1 mètre de hauteur et on demande de calculer le profil du courant à l'amont de ce barrage.*

Déterminons d'abord la hauteur d'eau qui convient au régime uniforme; elle résulte de l'équation

$$(a) \qquad RI = AU^2$$

dans laquelle : $\frac{\Omega}{X} = \frac{lh}{l+2h} = \frac{h}{1+h} \qquad i = 0{,}001 \qquad U = \frac{Q}{lh} = \frac{1}{2h}$

$$A = 0{,}00024\left(1 + \frac{0{,}25}{R}\right) = 0{,}00024\left(\frac{h + 0{,}25(1+h)}{h}\right)$$

portant ces nombres dans l'équation (*a*) et réduisant, on trouve :

$$(b) \qquad 2h^4 - 0{,}15h^2 - 0{,}18h - 0{,}03 = o$$

équation du quatrième degré, qui n'a qu'une racine positive et qu'il est facile de résoudre par tâtonnement.

En effet, en substituant à l'inconnue le nombre 1, le premier membre est égal à 1,64.

En substituant le nombre 0,5 on trouve — 0,0325 ; donc, la racine est comprise entre 1 et 0,5 et probablement très-voisine de ce dernier nombre.

En effet, elle est sensiblement égale à 0,52.

On a par conséquent : H = 0,52.

D'autre part nous avons l'équation différentielle :

$$(c) \qquad ds = dh.\frac{1 - \frac{\alpha U^2}{gh}}{i - \frac{AU^2}{R}}$$

qui, par l'intégration, devient :

$$(d) \qquad s - s_0 = \int_{h_0}^{h}\left(\frac{1 - \frac{\alpha U^2}{gh}}{i - \frac{AU^2}{R}}\right)dh$$

Nous ne chercherons pas à intégrer le second membre, ce qui nous entraînerait en des calculs compliqués et sujets à erreur.

Nous nous contenterons de nous donner une série de valeurs de h décroissant depuis la hauteur h_0 du barrage, jusqu'à la hauteur H, et nous en déduirons les distances $(s - s_0)$ des sections successives correspondant aux valeurs de h.

Si l'on désigne par y la valeur de la fraction

$$\frac{1 - \frac{\alpha U^2}{gh}}{i - \frac{AU^2}{R}}$$

dans laquelle on a substitué aux lettres leur valeur numérique, on aura à prendre l'intégrale de la quantité $y.dh$; c'est l'aire de la courbe ayant pour ordonnées les valeurs successives de y, et pour abscisses les valeurs correspondantes de h.

Grâce aux tables de M. Bazin, il est facile de calculer les valeurs de (y) ; elles sont résumées au tableau suivant :

HAUTEURS DE L'EAU	Surface Ω	Périmètre χ	Rayon moyen R	A	Vitesse U		$\frac{\alpha U^2}{gh}$	$1 - \frac{\alpha U^2}{gh}$	$\frac{AU^2}{R}$	$i - \frac{AU^2}{R}$	Fraction y
mètres 1.00	mètres 2.00	mètres 4.00	mètres 0.50	0.00056	mètres 0.50	1.08	0.0275	0.9725	0.00018	0.00082	1186
0.90	1.8	3.8	0.46	0.00037	0.55	1.08	0.0374	0 9626	0.00024	0.00076	1266
0 80	1.6	3.6	0.44	0.00038	0.62	1.08	0.0528	0.9472	0.00033	0.00067	1414
0.70	1.4	3.4	0.41	0.00039	0.71	1.08	0.0792	0.9208	0 00048	0.00052	1770
0.60	1.2	3.2	0.38	0.00040	0.83	1.08	0.1254	0.8746	0.00072	0.00028	3123
0.55	1.1	3.1	0.35	0.00041	0.91	1.08	0.1650	0.8350	0.00097	0.00003	27833
0 52	1.04	3 04	0.34	0.00042	0.96	1.08	»	»	»	»	»

Connaissant les valeurs de y, construisons la courbe ci-contre qui a pour abscisses les valeurs successives de h, et pour ordonnées les valeurs correspondantes de y. L'intégrale de $y.dh$ entre $h = 1$ mètre et $h = 0^m,90$ est donnée par l'aire du rectangle $mnpq$; la même intégrale entre $h = 0,90$ et $h = 0,80$ est donnée par l'aire du rectangle suivant, et ainsi de suite, de sorte qu'on peut dresser le tableau suivant (fig. 59) :

$s_1 - s_0$	est donnée numériquement par l'aire $mnpq$	ou par	$\frac{1186 + 1266}{2} \times 0,10 = 122$
$s_2 - s_1$	—	—	134
$s_3 - s_2$	—	—	159
$s_4 - s_3$	—	—	245
$s_5 - s_4$	—	—	1547

Ainsi, la hauteur d'eau, étant de 1 mètre sur le barrage, sera de

$0^m,90$	à 122 mètres plus loin,		
$0^m,80$	à (122 + 134) ou à	256 mètres plus loin,	
$0^m,70$	—	415	—
$0^m,60$	—	660	—
$0^m,55$	—	2207	—
$0^m,52$		à l'infini.	

Le remou sera donc encore de $0^m,03$ à 2,200 mètres au delà du barrage. Dans la pratique, pour l'établissement d'une usine, par exemple, on ne tiendrait pas compte d'un aussi faible remou, et on admettrait qu'il devient inoffensif à environ 1 kilomètre du barrage.

La figure 40 représente le profil en long du courant.

Application des formules aux cours d'eau à grande largeur. — La formule (10), page 91 s'applique aux cours d'eau à section rectangulaire; c'est d'elle qu'on se servira pour les ruisseaux et les petites rivières. En ce qui touche les rivières à grande largeur et à profondeur peu variable, on considérera la section comme un rectangle ayant pour base la largeur entière et pour hauteur la profondeur moyenne de l'eau.

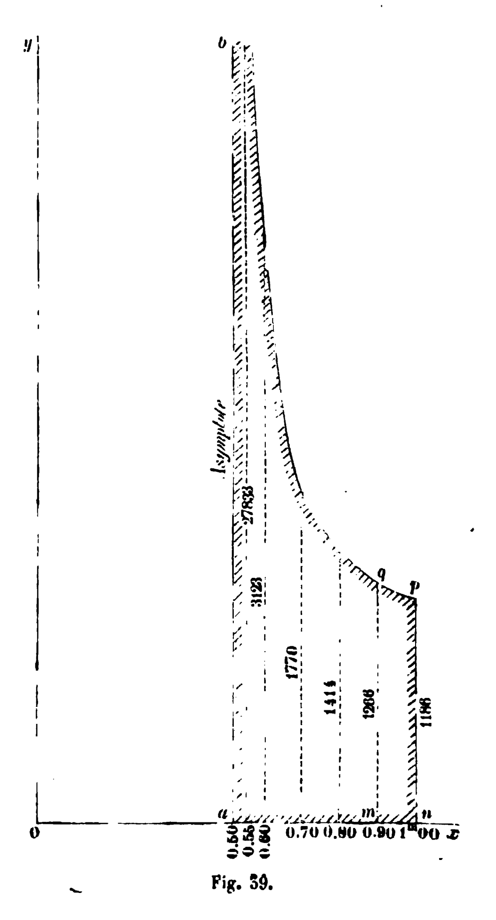


Fig. 39.

La section Ω est toujours égale à lh.

Le périmètre χ peut être considéré comme sensiblement égal à l, car la quantité $2h$ est insignifiante par rapport à la largeur.

Par suite, le rayon moyen R est égal à h.

La formule (10) devient donc

$$ds = \frac{l^2h^3 - \left(\frac{\alpha}{g}\right)Q^2}{il^2h^3 - AQ^2}\,dh$$

et, par intégration,

$$s - s_0 = \int_{h_0}^{h} \left(\frac{l^2h^3 - \frac{\alpha}{g}.Q^2}{il^2h^3 - AQ^2}\right).dh.$$

L'emploi de cette formule est identique à celui de la formule (d), page 96, dont nous venons de faire une application numérique, et nous ne pouvons qu'engager le lecteur à répéter sur la formule précédente cette application numérique.

Deuxième application. — *Un aqueduc à fond horizontal, à section rectangle de* $1^m,35$ *de largeur, doit débiter* 800 *litres ou* $0^{mc},8$ *à la seconde, quelle est la distance qui sépare le point où la hauteur d'eau est de* $1^m,70$ *du point où cette hauteur est de* $0^m,40$?

La solution de ce problème s'obtiendra au moyen de la formule (d) de la page 96, formule dans laquelle on fera $i = 0$; elle devient alors

$$s - s_0 = \int_{h_0}^{h} \left(\frac{1 - \frac{\alpha U^2}{gh}}{- \frac{AU^2}{R}} \right) . dh.$$

Nous n'avons pas à nous préoccuper dans ce cas de la hauteur du régime uni-

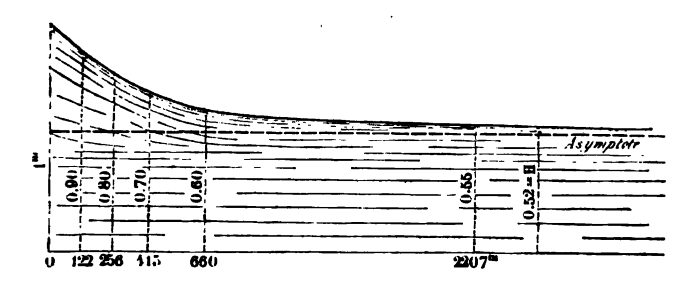


Fig. 40.

forme, car celui-ci est impossible ; la pente i étant nulle, l'équation $Ri = AU^2$ ne peut se réaliser que si U est nul, et alors le liquide est stagnant.

Calculons la valeur (y) de la fraction du second membre pour les valeurs de h égales à 1m,70, 1m,20, 1m,00, 0m,80, 0m,40.

Les calculs se trouveront, comme tout à l'heure, résumés dans le tableau suivant :

HAUTEUR h	Ω	χ	R	U	A	α	$\frac{\alpha U^2}{gh}$	$1 - \frac{\alpha U^2}{gh}$	$\frac{AU^2}{R}$	Fraction y
mètres 1.70	mètres 2.30	mètres 4.75	mètres 0.48	mètres 0.35	0.000218	1.05	0.007	0.993	0.000055	18054
1.20	1.62	3.75	0.43	0.49	0.000221	»	0.021	0.979	0.000123	7959
1.00	1.33	3.35	0.40	0.59	0.000223	»	0.038	0.962	0.000195	4934
0.80	1.08	2.95	0.36	0.74	0.000227	»	0.074	0.926	0.000347	2668
0.40	0.54	2.15	0.25	1.48	0.000243	»	0.590	0.410	0.002128	192

Connaissant les valeurs de (y), il est facile de construire une courbe ayant pour abscisses les valeurs successives de (h) et pour ordonnées les valeurs correspondantes de (y). L'aire de la portion de cette courbe comprise entre deux valeurs h_0 et h_1 de h représente l'intégrale de la quantité $y.dh$ prise entre h_0 et h_1 ; cette intégrale est précisément égale à $(s_1 - s_0)$, ainsi que cela résulte de l'équation fondamentale.

Sans tracer la courbe en question, désignons par h_0, h_1, h_2, h_3, h_4, les hauteurs

$1^m,70$, $1^m,20$, $1^m,00$, $0^m,80$, $0^m,40$; y_0, y_1, ... y_4 les valeurs de (y) correspondantes;

La quantité (s_1-s_0) sera représentée numériquement par $\frac{y_0+y_1}{2}(h_0-h_1)$

— (s_2-s_1) — — $\frac{y_1+y_2}{2}(h_1-h^2)$

et ainsi de suite.

On trouve ainsi que la différence

(s_1-s_0)	est égale à	6503 mètres.
s_2-s_1	—	1289 —
s_3-s_2	—	761 —
s_4-s_3	—	572 —
	Total. .	9125 mètres.

Ainsi, la distance qui sépare la section dans laquelle la hauteur d'eau est $1^m,70$ de celle où cette hauteur est réduite à $0^m,40$ est de 9,125 mètres.

Il est vrai que nous avons supposé que les parois étaient constamment lisses, c'est-à-dire garnies d'un enduit de ciment bien uni, constamment entretenu en bon état.

En réalité, il vaudrait mieux ne compter que sur des parois en maçonnerie ordinaire de moellon rejointoyé; les valeurs de A rentrent alors dans la troisième catégorie des formules de M. Bazin, et les tables nous donnent pour les cinq valeurs de ce coefficient

0,000365; 0,000380; 0,000390; 0,000407; 0,000480;

α varie de 1,08 à 1,10, on peut le prendre en moyenne égal à 1,09.

Si l'on calcule les cinq valeurs de (y) dans ces nouvelles conditions,

On trouve pour	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4
les nombres	10901	4657	2826	1486	95
qui correspondent aux valeurs	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4
égales à	$1^m,70$	$1^m,20$	$1^m,00$	$0^m,80$	$0^m,40$

Calculant comme tout à l'heure les intégrales définies de (s), nous arrivons à

s_1-s_0	égale à.	3889
s_2-s_1	—	748
s_3-s_2	—	431
s_4-s_3	—	316
	Total. . .	5384

Ainsi, avec des parois en maçonnerie ordinaire, il faudra un parcours de 5,384 mètres de longueur avant que la hauteur de la nappe d'eau s'abaisse de $1^m,70$ à $0^m.40$.

L'application précédente s'est rencontrée lors de la distribution dans Paris des eaux du canal de l'Ourcq.

Belanger l'a traitée en 1828 dans son essai sur la solution numérique de quelques questions relatives au mouvement permanent de l'eau dans les canaux découverts (page 13 de cet Essai).

Dupuit l'a traitée après Belanger dans ses *Études sur le mouvement des eaux* (page 75).

Le premier a trouvé une distance de 4,620 mètres, et le second de 4,632 mètres; nous trouvons, nous, 5,384 mètres. Cela tient à ce que nous avons substitué les formules de M. Bazin aux formules de de Prony, ce qui nous a donné pour le coefficient A des valeurs moindres.

Nous espérons que les renseignements précédents suffiront pour guider le lecteur dans la résolution des divers cas qui peuvent se présenter dans la pratique.

Calcul de la profondeur du ressaut. — La théorie précédente nous enseigne que, lorsqu on vient à établir un obstacle, un barrage par exemple, sur un courant régulier, la nouvelle surface du liquide se raccorde avec l'ancienne par une courbe généralement asymptotique que nous avons appris à calculer. Elle nous montre en outre que, dans certains cas, le raccordement asymptotique est impossible, et que ce raccordement se fait par une dénivellation brusque, par un ressaut.

C'est lorsque la quantité $\left(1-\frac{\alpha U^2}{gh}\right)$ passe du positif au négatif, ou inversement, c'est-à-dire lorsque cette quantité s'annule, que le ressaut peut se produire.

Nous avons calculé avec M. Bazin les pentes et la hauteur d'eau au delà desquelles le ressaut est possible, et nous avons reconnu que la possibilité du ressaut se présentait surtout avec des pentes rapides sur lesquelles s'écoulent de minces lames d'eau. Les eaux de la mer qui déferlent sur le rivage nous offrent un phénomène analogue.

Cherchons la relation qui lie entre elles les profondeurs du courant avant et après le ressaut; nous ne pouvons appliquer le théorème des forces vives, puisque nous ne connaissons point la perte de travail absorbée par les tourbillonnements et les chocs qui sont la suite du phénomène; mais le théorème des quantités de mouvement est toujours applicable.

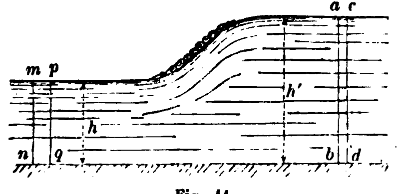


Fig. 41.

Considérons la section *mn* immédiatement en amont, et la section *ab* immédiatement en aval du ressaut ; soit h et v, h' et v' les hauteurs et les vitesses du liquide dans ces deux sections, π la densité du liquide, Q le débit du courant par seconde.

En une seconde, il passe en *mn* et *ab* une masse de liquide égale à $\frac{\pi Q}{g}$.

Si l'on néglige l'inclinaison du lit par rapport à l'horizon, ce qui est sans influence sensible sur la valeur des projections, on reconnaît, pendant une seconde, l'accroissement de la quantité de mouvement de la masse *mnab* qui passe en *pqcd*; cet accroissement est égal à

$$\frac{\pi Q}{g}(v'-v).$$

Il est égal à la somme des impulsions des forces extérieures projetées sur *nb*; or, l'inclinaison du fond, quoique relativement considérable, est assez faible pour

qu'on puisse confondre nb avec une horizontale et négliger la projection de l'impulsion de la pesanteur.

Les seules forces de l'impulsion desquelles il y ait lieu de tenir compte sont donc :

La pression en avant dans la section transversale mn ou ω
— en aval — — ab ou ω'.

Si nous nous reportons aux explications données à propos du théorème de Bernoulli, nous nous rappelons que la pression varie sensiblement suivant la loi hydrostatique dans les sections mn et ab; les pressions totales dans ces deux sections sont donc :

$$\frac{1}{2}\pi.\omega.h. \quad \text{et} \quad \frac{1}{2}\pi.\omega'h'$$

et leurs impulsions pendant une seconde sont représentées par ces mêmes expressions.

Égalant les quantités de mouvement et les impulsions des forces, nous arrivons à l'équation :

$$(1) \quad \frac{\pi Q}{g}(v'-v) = \frac{1}{2}\pi(\omega h - \omega' h')$$

que l'on peut combiner avec :

$$Q = \omega v = \omega' v';$$

la largeur du canal étant constante, les hauteurs h et h' sont en raison directe des sections ω et ω', d'où :

$$\frac{h}{h'} = \frac{\omega}{\omega'} = \frac{v'}{v}$$

Remplaçant dans (1) Q par ωv, v' par $\left(\frac{vh}{h'}\right)$ et ω' par $\left(\omega\ \frac{h'}{h}\right)$ et faisant disparaître le facteur commun $\pi\omega$, il vient

$$\frac{v}{g}\left(\frac{vh}{h'} - v\right) = \frac{1}{2}\left(h - \frac{h'^2}{h}\right) \quad \text{ou} \quad (2) \quad \frac{v^2}{g} = \frac{h'}{2}\cdot\frac{h+h'}{h}$$

Cette équation (2) permettra de calculer la vitesse v du mouvement uniforme avant le ressaut, lorsqu'on connaîtra les profondeurs h et h' en amont et en aval du ressaut. Connaissant v, il sera facile de calculer v' et par suite la perte de force vive produite par le ressaut.

Supposons, au contraire, que l'on connaisse v et h, on pourra résoudre alors l'équation (2) par rapport à h'; elle est du second degré et donne en choisissant la racine positive :

$$(3) \quad h' = -\frac{h}{2} + \sqrt{\frac{h^2}{4} + \frac{2hv^2}{g}}$$

Il ne peut y avoir ressaut que si h' est supérieure à h, c'est-à-dire si l'inégalité

$$-\frac{h}{2} + \sqrt{\frac{h^2}{4} + \frac{2v^2h}{g}} > h$$

est vérifiée; ce qui donne

$$(4) \qquad \frac{v^2}{2g} > \frac{h}{2}, \quad \text{ou bien :} \quad 1 - \frac{v^2}{gh} < o.$$

C'est précisément la condition

$$1 - \alpha \frac{U^2}{gh} < o$$

que nous avons trouvée précédemment.

La condition (4) peut se formuler comme il suit en langage ordinaire :

La hauteur due à la vitesse v doit être supérieure à la moitié de la profondeur de la lame d'eau qui parcourt le canal.

Avantages du ressaut à l'aval des roues hydrauliques. — Il est souvent possible de disposer le canal de fuite des roues hydrauliques de telle sorte que la lame d'eau qui s'échappe soit assez mince et sa pente assez rapide pour que le raccordement se fasse avec le bief d'aval au moyen d'un ressaut. On conçoit que c'est là une manière de dégager la roue à l'aval, ce qui revient d'une manière indirecte à augmenter la chute.

Des remous produits par les changements brusques de section. — Lorsqu'on établit dans le lit d'une rivière ou d'un canal un obstacle discontinu, tel que des piles de pont, on retrécit la section, la vitesse doit s'accroître au passage de l'obstacle, et cet accroissement ne s obtient que par une surélévation du niveau d'amont.

Nous avons donné, dans notre *Traité des ponts*, les méthodes qui servent à calculer ce genre de remous et nous prierons le lecteur de vouloir bien s'y reporter.

Expériences de M Bazin sur le mouvement varié dans les canaux. — Les expériences de M. Bazin ont surtout porté sur le mouvement uniforme dans les canaux, mais on lui en doit aussi quelques unes sur le mouvement varié et sur le ressaut, et nous allons en examiner sommairement les résultats.

Trois séries d expériences concernent le remou de gonflement et trois autres le remou d'abaissement; dans le premier cas, le remou était produit par des barrages plus ou moins élevés qui retenaient l'eau et déterminaient la surélévation de la surface du courant; dans le second cas, le remou d'abaissement fut étudié sous trois formes différentes: 1° on remplaça un des barrages de la première série par une chute brusque ; 2° on fit couler un courant dans un canal horizontal en planches ; 3° on observa le profil en long du courant dans l'aqueduc de ceinture de Paris dont le fond est presque horizontal sur 4 kilomètres de longueur (c'est précisément à cet aqueduc qu'a trait le second calcul pratique développé plus haut).

On trouvera dans les tableaux de M. Bazin les ordonnées qui déterminent les profils du remou dans les diverses expériences.

Nous nous contenterons de rapporter les nombres relatifs à l'aqueduc de ceinture, aqueduc horizontal à section sensiblement rectangulaire de $1^m,35$ de large :

DISTANCE A L'ORIGINE	PROFONDEUR D'EAU	DISTANCE A L'ORIGINE	PROFONDEUR D'EAU	DISTANCE A L'ORIGINE	PROFONDEUR D'EAU	DISTANCE A L'ORIGINE	PROFONDEUR D'EAU
mètres »	mètres 1.49	mètres 1000	mètres 1.35	mètres 2000	mètres 1.16	mètres 3000	mètres 0.95
100	1.34	1100	1.39	2100	1.18	3100	0.94
200	1.26	1200	1.39	2200	1.14	3200	1.06
300	1.46	1300	1.41	2300	1.15	3300	0.99
400	1.30	1400	1.32	2400	1.11	3400	0.97
500	1.34	1500	1.28	2500	1.12	3500	0.95
600	1.56	1600	1.25	2600	1.12	3600	0.91
700	1.62	1700	1.22	2700	1.11	3700	0.85
800	1.45	1800	1.21	2800	1.11	3800	0.74
900	1.33	1900	1.19	2900	1.04	3900	0.70

La profondeur d'eau à l'origine était de $1^m,49$ et de $0^m,70$ à la distance 3,900 mètres. Avec ces nombres, on pourra reconstruire le courant.

La grande difficulté dans l'étude du mouvement varié, dit M. Bazin, c'est de connaître la valeur du coefficient de résistance A. « Rien ne prouve, en effet, que ce coefficient soit le même que dans le cas du régime uniforme ; on doit même penser, *à priori*, que les mouvements obliques auxquels donne lieu le changement progressif de la section modifient le coefficient A, et lui font prendre des valeurs différentes suivant le point du courant que l'on considère. »

C'est le point capital à éclaircir :

Reprenons la formule générale (5 *bis*), page 87, du mouvement varié :

$$y=\alpha\frac{U^2-U^2_0}{2g}+\int_0^s\frac{AU^2}{R}.ds.$$

En chaque section, recherchons par l'expérience les valeurs de y, U et R, et construisons une courbe ayant pour ordonnée :

$$Y=y-\alpha\frac{U^2-U^2_0}{2g}$$

et pour abscisse

$$X=\int_0^s\frac{U^2}{R}ds;$$

Menons la tangente en chaque point de la courbe ainsi construite ; l'inclinaison de cette tangente sur l'axe des X est donnée par

$$\left(\frac{dY}{dX}\right),\text{ quantité égale à }\frac{R}{U^2}\left(\frac{dy}{ds}-\frac{\alpha U}{g}\cdot\frac{dU}{ds}\right),$$

Or, si de l'équation (5), page 87, équation différentielle du mouvement varié, on tire la valeur de A, il se trouve que cette valeur est précisément égale à la quantité ci-dessus.

Les variations de A sont donc indiquées par la forme même de la courbe construite avec les ordonnées X Y.

M. Bazin a construit cette courbe pour les diverses séries d'expériences dont il disposait, et il a reconnu qu'elle se confondait sensiblement avec une ligne droite.

La valeur de $\left(\frac{dY}{dX}\right)$ est donc constante, et par suite il en est de même de A.

D'où ce résultat important :

Dans le mouvement varié on peut adopter pour le coefficient A une valeur constante ; « cette valeur doit, par cela même, ne pas s'éloigner beaucoup de celle qui convient au courant dans son état naturel, c'est-à-dire lorsqu'il n'est ni relevé ni abaissé. »

Ce principe admis, on pourra simplifier les calculs du mouvement varié ; dans les applications numériques que nous avons données, nous pouvions donc adopter pour A une valeur constante, celle qui convenait au régime uniforme.

On reconnaît, en effet, qu'en adoptant cette valeur et calculant les profils, ces profils calculés concordent d'une manière satisfaisante avec les profils réels.

Du ressaut. — Le ressaut, très-rare dans les canaux naturels, se rencontre assez fréquemment dans les canaux artificiels ou dans les canaux d'expérience à parois régulières et à forte pente. M. Bazin a déterminé la formation de plusieurs ressauts dont il a relevé les profils.

M. l'ingénieur Baumgarten avait, de son côté, relevé les profils de deux ressauts remarquables constatés l'un sur le pont aqueduc de Roquefavour (canal de Marseille), l'autre sur le pont aqueduc de Crau (canal de Craponne) ; le profil de ce dernier est représenté par la figure 3, planche B ; il est produit par un changement brusque de pente.

Le ressaut est d'autant plus allongé et ressemble d'autant plus à une contre-pente que la quantité $\left(\frac{\alpha U^2}{gh}\right)$ est plus voisine de l'unité. A mesure que cette quantité s'écarte de l'unité, le ressaut s'accentue ; il est bien accusé lorsque cette quantité est égale à 2, et il se trouve alors resserré dans un intervalle de quelques mètres ; c'est un véritable ressaut bien marqué par une barre d'écume et par une ascension brusque de la surface liquide.

Le ressaut est toujours immédiatement suivi d'ondulations qui deviennent très-fortes lorsque le ressaut est très-brusque, et qui s'opposent à une opération exacte de nivellement.

Ces ondulations sont plus accentuées au milieu du courant que sur les bords ; le profil en travers du courant est donc convexe et ce courant affecte la forme en dos d'âne ; quant à la barre qui marque l'emplacement du remou, elle est courbée de manière à présenter sa concavité vers l'amont.

FORMULES NOUVELLES POUR CALCULER LE DÉBIT DES CANAUX

Dans ces dernières années il a été proposé, en France et surtout à l'étranger, diverses formules qui sont plus ou moins différentes de celle de de Prony corrigée par M. Bazin. Il nous suffira de les citer ici :

Les formules monômes, analogues à celle de M. de Saint-Venant :

$$RI=0{,}000401\ U^{\frac{21}{11}}.$$

semblent les plus commodes, et beaucoup d'auteurs les ont recherchées.

M. l'ingénieur Gauckler en a établi deux d'après les résultats des expériences de M. Bazin.

Pour les canaux dont la pente est supérieure à 0,0007, il adopte

$$\sqrt{U}=\alpha\sqrt[3]{R}\sqrt[4]{I}$$

et pour les canaux dont la pente est inférieure à 0,0007, il adopte

$$\sqrt[4]{U}=\alpha\sqrt[3]{R}\sqrt[4]{I}$$

Cette formule monôme s'applique bien aux canaux avec parois en bois, parce qu'elle a été établie à l'aide des expériences sur les canaux. Mais elle renferme très-mal toutes les expériences relatives aux canaux en terre, et il faut dans ce cas donner aux exposants des valeurs variables.

La formule binôme de M. Bazin paraît donc préférable.

MM. Humphreys et Abbott, à qui l'on doit de nombreuses expériences sur le Mississipi, ont donné une formule simplifiée.

Le coefficient de résistance A, au lieu de représenter $\frac{RI}{U^2}$ est égal à $b\sqrt{I}$; il ne varierait, suivant eux, qu'avec la pente ; or, dans les canaux artificiels, il est reconnu que le coefficient A varie surtout avec le rayon moyen et fort peu avec la pente ; la formule américaine est donc inadmissible pour les canaux artificiels ; du reste, elle a été établie en vue des grands canaux naturels.

M. Hagen a présenté, dans les Mémoires de l'Académie de Berlin, une formule presque identique à la formule américaine et encore plus inexacte.

C'est donc aux formules binômes que nous devons accorder la préférence.

La formule de MM. Darcy et Bazin

$$A=\frac{RI}{U^2}=\alpha+\frac{\beta}{R}$$

satisfait à tous les cas de l'expérience ; elle ne fait varier le coefficient A qu'avec le rayon moyen et non avec la pente. Cependant, lorsque la pente est faible et que les parois sont unies, l'influence de la pente devient comparable à celle du rayon moyen et son influence se fait sentir

C'est pourquoi, lorsqu'on fait des calculs de débit sur des canaux artificiels à parois lisses et à faible pente, il ne faut compter que sur un débit inférieur à

celui qui résulte des formules; la diminution de débit est encore accusée par ce fait qu à une pente faible correspond une vitesse faible, et que les parois du canal se recouvrent facilement d'une couche adhérente plus ou moins rugueuse.

MM. Humphreys et Abbott ont présenté la formule suivante applicable aux canaux naturels :

$$\sqrt{U} = \sqrt{0{,}0081.b + \sqrt{68{,}7R_1\sqrt{I}}} - 0{,}09\sqrt{b}$$

formule dans laquelle le coefficient (b) est lui-même variable et fourni par la relation

$$b = \frac{0{,}284}{\sqrt{R + 0{,}457}}$$

Dans la première formule, le rayon R_1 est le quotient de la surface d'écoulement par le périmètre total comprenant non-seulement le périmètre mouillé, mais encore la ligne d'eau; dans la seconde formule, le rayon R a sa signification ordinaire. Dans une rivière naturelle, on peut toujours sans inconvénient remplacer R_1 par $\frac{1}{2}$ R ou par 0,52 R.

Nous ferons tout d'abord un grave reproche à la formule américaine, c'est qu'elle est trop compliquée pour une formule empirique.

De plus, elle a été établie avec un très petit nombre d'expériences; elle ne s'applique en aucune façon, ainsi que l'a montré M. Bazin, aux nombreuses expériences effectuées en Europe, soit sur les canaux artificiels, soit même sur les canaux naturels.

En admettant qu'on la conserve, il ne faudrait l'employer que s'il s'agissait de très-grands fleuves à très-faibles pentes, comme le Mississipi.

Le travail de MM. Humphreys et Abbott a été résumé en français par M. l'ingénieur Fournié.

Deux ingénieurs suisses, MM. Ganguillet et Kutter, ont tenté de faire entrer dans une même formule les résultats des expériences de M. Bazin et de celles des ingénieurs américains.

Leur formule est assez compliquée; elle a été remaniée par M. Bazin qui a montré que le coefficient A pouvait être mis sous la forme

$$\alpha\left(1 + \frac{K}{R}\right)$$

Dans le cas des cours d'eau torrentiels charriant des galets,

$$\left.\begin{array}{lr} \alpha \text{ est égal à} \ldots\ldots\ldots & 0{,}0004 \\ K \quad — \quad \ldots\ldots\ldots & 1{,}75 \end{array}\right\}$$

Ces données peuvent être utiles aux ingénieurs chargés d'études en pays de *montagnes.*

Aucune des formules proposées ne paraît meilleure que celle de de Prony, *transformée par M.* Bazin; c'est elle qu'il faut préférer dans l'immense généralité *des cas.*

CHAPITRE IV

PRESSIONS RÉCIPROQUES DES CORPS SOLIDES ET DE L'EAU EN MOUVEMENT. JAUGEAGE DES COURS D'EAU

Lorsqu'une surface solide est plongée dans un courant fluide, chaque élément de cette surface reçoit de la part du fluide une pression, et la résultante de ces pressions élémentaires représente l'action totale de la masse fluide sur la surface solide. En général, cette résultante est dirigée en sens inverse du mouvement relatif de la surface, et elle s'oppose à ce mouvement ; pour la vaincre, il faut développer un certain travail de propulsion.

Ce travail de propulsion est demandé aux êtres animés, au vent ou à la vapeur.

Pression d'une veine liquide contre un plan. — Considérons une surface plane ox faisant avec la verticale un angle α ; cette surface est frappée par une veine liquide mn composée de filets parallèles dont la direction fait l'angle β avec le plan ox.

Dans la portion mn où la veine reste cylindrique, la pression à l'intérieur de la veine est constante et égale à la pression atmosphérique.

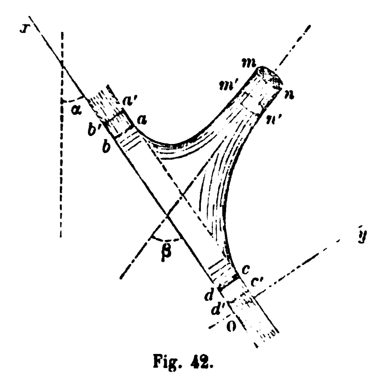


Fig. 42.

Quand le choc de la veine vient à se produire contre le plan, l'eau rejaillit de toutes parts, et il est impossible de soumettre le phénomène au calcul ; mais l'air interposé entre les filets liquides ne tarde pas à être expulsé, un mouvement continu et permanent s'établit ; les filets liquides, progressivement déviés, finissent par devenir parallèles à la surface plane ox ; c'est par exemple au delà de la surface cylindrique $abcd$ que la déviation est complète, et que le parallélisme des filets liquides et du plan est établi. A partir de cette surface cylindrique, les réactions des filets entre eux et sur la paroi plane sont parallèles à cette paroi.

Appliquons le théorème des quantités de mouvement et des impulsions des forces à la masse liquide $mnabcd$; soit ω la section mn de la veine et v sa vitesse. Au bout d'un temps élémentaire dt, la masse liquide considérée a passé de $mnabcd$ en $m'n'a'b'c'd'$; en vertu de la permanence, les vitesses sont restées les mêmes dans la partie commune $m'n'abcd$; cette partie n'entre donc pas dans l'accroissement des quantités de mouvement.

Prenons comme axe de projection la normale oy à la paroi plane ox; les vitesses du volume liquide $abcda'b'c'd'$ étant normales à l'axe de projection, la projection des quantités de mouvement correspondantes est nulle; la quantité de mouvement de la partie $mnm'n'$ (produit de la masse par l'espace parcouru) est égale à

$$\frac{\pi}{g}\omega.v^2.dt$$

et sa projection sur l'axe oy est représentée par

$$-\frac{\pi}{g}\omega v^2.dt.\sin\beta.$$

L'accroissement de la projection des quantités de mouvement, lorsque la masse $mnabcd$ passe en $m'n'a'b'c'd'$, est donc égale à

$$\frac{\pi}{g}.\omega.v^2.\sin\beta.dt.$$

Reste à apprécier les projections des impulsions des forces.

La pression atmosphérique s'exerçant sur un contour fermé a une résultante nulle; le poids p de la masse liquide considéré a pour projection de son impulsion la quantité $-p\sin\alpha dt$.

Si nous désignons par F la résultante des réactions normales de la surface plane sur le liquide, la projection de son impulsion est Fdt; quant aux réactions tangentielles, leur projection est nulle.

Égalant la projection de l'accroissement de la quantité de mouvement et la projection des impulsions des forces, et faisant disparaître le facteur commun dt, il vient

$$F = p\sin\alpha + \frac{\pi}{g}.\omega.v^2.\sin\beta.$$

F représente la pression totale de la veine liquide sur la paroi plane; elle comprend deux termes ayant chacun leur signification.

Le premier correspond à la pression statique qu'exercerait sur le plan incliné ox la masse pesante représentée par la veine dénuée de mouvement.

Le second correspond à la pression dynamique; il varie proportionnellement au carré de la vitesse, et dans le cas où la veine est normale au plan, ce terme est représenté par le poids d'un cylindre liquide ayant pour base la section de la veine, et pour hauteur le double de la hauteur $\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ due à la vitesse d'écoulement de cette veine.

Dans l'étude qui précède, nous avons supposé que la paroi plane était suffisamment étendue pour qu'avant de la quitter tous les filets liquides lui soient devenus parallèles; si cette paroi était trop étroite, les filets liquides conserveraient en la quittant une certaine vitesse dirigée dans le même sens que la vitesse de la veine, et faisant avec la normale ox un angle obtus, la pression F se trouverait diminuée. Le même effet se produirait si la veine venait choquer une surface convexe; au contraire, si la paroi plane était munie de rebords saillants regardant la veine liquide, les filets liquides, en la quittant, conserveraient

une vitesse dirigée en sens inverse de celle de la veine, et la pression F se trouverait accrue; le même effet se produirait si la veine venait choquer une surface concave.

Nous avons supposé la paroi immobile, mais le calcul serait le même si elle était animée d'une certaine vitesse; il faudrait seulement remplacer la vitesse réelle de la veine par sa vitesse relative.

Résistance d'un fluide au mouvement d'un solide. — La résistance d'un fluide au mouvement d'un solide est sensiblement proportionnelle : 1° au carré de la vitesse relative du solide; 2° à la surface du solide.

Elle dépend en outre essentiellement de la densité du fluide et de la forme de la surface qui reçoit le choc.

On peut mesurer la résistance de l'eau au mouvement d'un corps solide par l'expérience suivante :

Un corps AB est plongé totalement ou en partie dans un liquide; à ce corps est attachée une ficelle qui passe sur une poulie horizontale, s'élève verticalement, passe sur une seconde poulie horizontale, puis redescend pour supporter un plateau que l'on charge de poids variables. On arrive par tâtonnement à une charge telle que le mouvement du mobile AB soit uniforme; alors, le poids P représente précisément la réaction du liquide sur le solide.

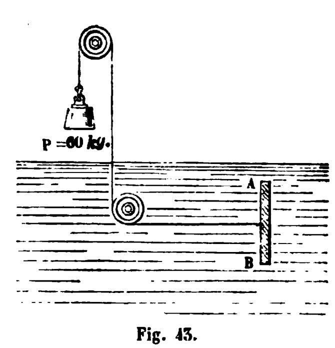


Fig. 43.

En particulier, la résistance d'une surface plane AB de 1 mètre carré de superficie, animée d'une vitesse de 1 mètre par seconde, est de 60 kilogrammes.

S'il s'agit d'une palette plane de surface S, animée d'une vitesse relative V, la résistance R du liquide sera donc exprimée par

$$R = 60 . S . V^2 .$$

C'est la formule ordinairement employée pour calculer l'action des palettes des roues dans les bateaux; connaissant le diamètre de la roue, les dimensions de la palette et la vitesse du navire, d'où on déduit le nombre de tours de la roue par seconde et par suite la vitesse de la palette, on peut calculer l'effort que la roue exercera sur l'eau, ou, ce qui est la même chose, la réaction de l'eau ou la force de propulsion du navire.

Résistance des corps prismatiques flottants. — On doit à Dubuat des expériences sur la résistance au mouvement des corps prismatiques flottants dans un courant indéfini.

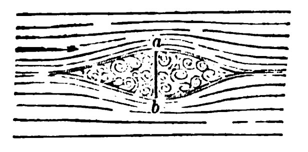


Fig. 44.

Il a commencé par une lame mince verticale ab; les filets liquides sont déviés à l'amont et à l'aval de la plaque, et il se forme des deux côtés deux espaces remplis d'un liquide tourbillonnant sur place. Ces espaces sont limités en section horizontale à des triangles curvilignes ayant pour base la plaque ab; les côtés du triangle d'amont ont leur convexité tournée vers la plaque; pour les côtés du triangle d'aval, c'est au contraire leur concavité qui regarde la plaque.

Si on recherche par un tube piézométrique la pression du liquide dans ces

espaces occupés par les tourbillons, on reconnaît qu'à l'amont elle est supérieure à la pression hydrostatique, tandis qu'elle lui est inférieure à l'aval. Cela se conçoit, car la masse liquide en mouvement exerce sur l'espace d'amont une sorte de compression et une sorte de succion sur l'espace d'aval.

Quant à la résultante des pressions, c'est-à-dire à la résistance au mouvement, elle prend la valeur que nous avons dite plus haut, et si l'on désigne par π la densité du liquide, la résistance peut être exprimée par la formule

$$R = K.\pi.s.\frac{v^2}{2g},$$

k étant un coefficient numérique variable avec la forme du prisme triangulaire.

A mesure que la poupe devient plus aiguë, c'est-à-dire à mesure que l'angle d'avant du prisme diminue, la résistance diminue aussi.

Lorsque la saillie du prisme sur sa face d'aval est égale à trois fois la dimension moyenne de la section s ou à $(3\sqrt{s})$, le coefficient

K est égal à 1,10;

quand l'acuité est plus considérable,

K devient égal à 1;

et si l'on établit à l'arrière du prisme une proue formée d'un demi-cylindre vertical,

Le coefficient K s'abaisse à 0,5;

lorsqu'il s'agit d'une forme de navire, si on désigne par s la section transversale maxima au-dessous du liquide, section qui porte le nom de maitre-couple,

Le coefficient K descend même jusqu'à 0,16.

Résistance au mouvement d'un navire. — La résistance au mouvement d'un navire s'exprime simplement par la formule

$$R = K.s.v^2$$

dans laquelle K est un coefficient numérique

s la surface immergée du maître-couple en mètres carrés,
v la vitesse du bâtiment en mètres à la seconde.
R est exprimé en kilogrammes.

Le coefficient K varie avec la forme des navires, et aussi avec la vitesse d'un même navire; à l'avant d'un navire en marche, l'eau se gonfle et s'élève le long des parois, au contraire elle se déprime à l'aval; la dénivellation est d'autant plus forte que le navire est plus court et moins élancé; elle augmente aussi quand la calaison diminue et quand la vitesse augmente.

Voici, d'après M. Ledieu, les valeurs des coefficients de résistance K par un temps calme pour des sillages de 3 à 5 nœuds d'une part, et de 10 à 11 nœuds d'autre part :

DÉSIGNATION DES NAVIRES	VALEUR DE K POUR UNE VITESSE DE 3 A 5 NŒUDS	VALEUR DE K POUR UNE VITESSE DE 10 A 11 NŒUDS.
Vaisseaux rapides et frégates blindées.	2.7	3.0
Vaisseaux mixtes.	2.8	3.3
Frégates rapides.	3.3	3.7
Corvettes rapides.	3.3	3.8
Avisos à vapeur..	3.6	4.6
Canonnières..	3.9	5.5

Rappelons ici que la longueur d'un nœud est de 15^{m},43; un navire file autant de nœuds qu'il parcourt de fois 15^{m},43 en une demi-minute ou trente secondes.

La vitesse d'un nœud correspond donc à une vitesse d'un mille marin (1,852 mètres) à l'heure et à une vitesse de 0^{m},514 à la seconde.

Connaissant la résistance d'un navire, le produit RV donnera le travail à produire par la machine et permettra de déterminer la puissance de cette machine et les dimensions des roues.

Il existe pour chaque navire une vitesse qu'on ne peut dépasser; la résistance croît très-vite avec la vitesse, tandis que la puissance de la machine est limitée.

M. Bourgeois a donné, pour déterminer le coefficient de résistance K, les formules suivantes :

1° Pour les navires doublés de cuivre, en bon état, dont la longueur est moindre que quatre fois la largeur :

$$K=2+0,16\frac{lv^2}{s}+0,08\frac{A}{sv};$$

2° Pour les navires à hélice avec carène en fer ou en bois doublé de cuivre, en bon état de propreté, la longueur étant comprise entre cinq et six fois la largeur :

$$K=2,2+0,14\frac{lv^2}{s}+0,08\frac{A}{s.v}.$$

Dans ces formules s est toujours la section immergée du maître-couple exprimée en mètres, l est la largeur de ce maître-couple à la flottaison, A est la surface frottante du navire dans la direction du mouvement ; L étant la longueur du navire et t son tirant d'eau moyen, la surface frottante A est sensiblement égale à $0,6L(l+2t)$.

Ces formules pourront trouver leur application dans les questions relatives à la navigation fluviale.

JAUGEAGE DES COURS D'EAU.

Jauger un cours d'eau c'est trouver son débit pendant l'unité de temps, c'est-à-dire trouver le volume qui passe pendant l'unité de temps dans une section donnée.

Pour ne point changer les unités généralement adoptées, le jaugeage doit

s'exprimer en mètres cubes à la seconde; multipliant par 1,000 le nombre ainsi obtenu, on a le débit en litres.

Pouce de fontainier. — Autrefois, l'unité de mesure pour les débits d'eau était le pouce de fontainier. Le pouce de fontainier était égal au débit par minute d'un orifice circulaire en mince paroi, d'un pouce ($0^m,0271$) de diamètre, percé dans la paroi d'un réservoir dans lequel l'eau était maintenue à un niveau constant de 7 lignes ($0^m,0158$) au-dessus du centre de l'orifice. Le pouce de fontainier était de 14 pintes 48 pouces cubes, ou de $13^{lit},33$ par minute, ce qui fait $0^{lit},2217$ par seconde.

M. de Prony avait tenté d'introduire une unité analogue qu'il appelait le module; l'usage ne s'en est pas conservé.

Pour exprimer le débit d'une source en pouces de fontainier, on la recevait dans une caisse en tôle, portant sur une même ligne horizontale un certain nombre de trous d'un pouce de diamètre, munis chacun d'un obturateur; la caisse portait latéralement un déversoir arasé à 7 lignes au-dessus du centre des trous. Pour maintenir dans la caisse le niveau constant à la hauteur du déversoir, il fallait ouvrir un nombre plus ou moins grand de trous, et ce nombre mesurait en pouces de fontainier le débit de la source.

Jaugeages par déversoir. — Aujourd'hui, le jaugeage des sources et des petits cours d'eau s'effectue au moyen de vannes ou de déversoirs; on s'arrange de manière à maintenir le niveau d'amont à un repère constant, tout en faisant passer le débit total soit sur un déversoir, soit par un vannage.

Nous avons donné aux pages 31 et 41, les formules relatives aux vannes, et à la page 51 les formules relatives aux déversoirs. Le lecteur trouvera là tous les renseignements nécessaires.

Jaugeage par la recherche des vitesses. — Dès que l'on se trouve en présence d'un cours d'eau de quelque importance, les méthodes précédentes sont inapplicables.

Pour arriver à un résultat d'une exactitude mathématique, il faudrait relever la vitesse en tous les points d'une même section transversale et multiplier chaque vitesse par la section élémentaire correspondante. La somme de tous ces produits donnerait le débit total.

Malheureusement, c'est une opération longue et difficile de relever les vitesses non-seulement à la surface d'un courant, mais encore en beaucoup de points de la section de ce courant.

Lorsqu'on n'a pas besoin d'une grande exactitude, on se contente de déterminer à l'aide d'un flotteur la vitesse maxima à la surface du courant, et on en déduit la vitesse moyenne à l'aide des formules et des tables de la page 71.

Nous rappellerons que la formule de de Prony est inexacte, et qu'il faut recourir aux formules de M. Bazin, et mieux encore à ses tables que nous avons reproduites à la page 73 du présent traité.

Enfin, l'emploi des formules donnant la vitesse moyenne en fonction de la vitesse maxima ne suffit plus lorsque l'on veut obtenir un résultat bien précis, et lorsqu'il s'agit de déterminer le débit d'un grand cours d'eau :

Alors on relève avec une grande exactitude une section transversale et on détermine la vitesse en des points rapprochés de cette section; on a recours à cet effet, à l'un des instruments que nous décrirons tout à l'heure. On divise la section transversale en une série de sections élémentaires correspondant aux points d'expérience, et dans chaque section élémentaire on admet une vitesse constante égale à celle qu'on a trouvée au point d'expérience qui correspond à

cette section. La somme des débits ainsi trouvés représente d'une manière suffisamment exacte pour la pratique le débit total du cours d'eau.

Tout revient donc à déterminer soit une vitesse à la surface, soit une vitesse à l'intérieur d'une masse liquide.

Les vitesses à la surface s'obtiennent généralement au moyen de flotteurs ; les vitesses à l'intérieur s'obtiennent à l'aide de divers appareils, dont les plus connus et les plus maniables sont le moulinet de Woltmann et le tube de Pitot perfectionné par Darcy.

Des flotteurs. — Les flotteurs les plus simples consistent en de petits morceaux de bois ou de papier que l'on abandonne au fil de l'eau, et voici comment on opère :

On plante sur la rive deux piquets ou repères *a* et *b*, espacés d'une distance *d* ; à l'amont de *a* on lâche un flotteur, on observe à l'aide d'une montre à secondes les instants du passage en *a* et *b*, et on en déduit par conséquent le temps qu'il a fallu au flotteur pour parcourir la distance *d*. Une seule épreuve serait insuffisante, on la renouvelle plusieurs fois et on obtient une moyenne du nombre de secondes *t* qu'il faut à un flotteur pour parcourir la distance *d* exprimée en mètres. La vitesse au milieu du courant sera donc exprimée par le rapport $\frac{d}{t}$.

Les flotteurs de superficie, aussi légers que le papier ou le bois, sont très-mauvais ; ils obéissent à l'action du vent, ils sont arrêtés par le moindre obstacle et ne donnent que des résultats incertains.

Nous avons trouvé une assez grande régularité dans les indications du flotteur suivant, bien facile à construire :

Nous prenons une petite bouteille *a*, d'un décilitre par exemple ; à son goulot, nous attachons par une courte ficelle un bouchon ordinaire *b*; la bouteille *a* est munie de son bouchon, on la leste à l'intérieur, soit avec de la grenaille de plomb, soit avec de l'eau, de telle sorte que tout l'appareil flotte, le bouchon *b* restant seul à la surface du liquide ; après quelques tâtonnements, on arrive en un instant à ce résultat. On a alors un flotteur presque insensible au vent et à la résistance de l'air et qui marche avec la vitesse moyenne des filets situés dans le voisinage de la surface. Lorsqu'on lance l'appareil dans l'eau, il plonge d'abord, puis se relève, et après quelques oscillations se fixe dans la position indiquée par la figure.

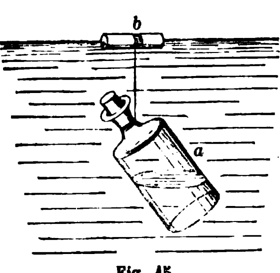


Fig. 45.

Les ingénieurs américains, dans leurs expériences sur le Mississipi, dont nous avons déjà parlé, ont employé en grand ce genre de flotteur ; ils se servaient de barils sans fond, lestés avec des saumons de plomb, de manière à rester verticaux ; le baril est lié par un cordage à un flotteur de superficie, une caisse creuse par exemple, portant une tige verticale en fil de fer terminée par un petit drapeau.

En allongeant ou en raccourcissant le cordage, on plaçait le baril à diverses hauteurs et on pouvait ainsi déterminer la vitesse en un élément quelconque du courant.

Il faut dire cependant que, sous de grandes dimensions, ce flotteur complexe doit perdre de ses avantages, car la résistance du cordage et du flotteur de superficie n'est pas sans influence.

Appareils divers pour mesurer les vitesses. — Certains expérimentateurs ont mis en œuvre des appareils spéciaux qu'il suffira de rappeler, car l'usage ne s'en est pas propagé.

Ainsi, on a eu recours à des flotteurs composés d'une sorte de bâton régulier, lesté à sa partie inférieure, de manière à se tenir debout dans l'eau et à descendre sensiblement jusqu'au fond du courant; ce bâton est abandonné au fil de l'eau et descend incliné vers l'aval; sa vitesse représente la vitesse moyenne de l'eau dans le plan vertical qu'il parcourt.

Le capitaine Boileau, auteur d'un traité du mouvement des eaux, se servait d'un tube en verre, immergé parallèlement au courant et renfermant une bulle d'air dont on mesurait la vitesse de déplacement; cette vitesse de déplacement était liée par une relation fixe avec la vitesse du courant et on tarait l'appareil en faisant mouvoir le tube à des vitesses connues dans une eau stagnante. La vitesse de la bulle d'air était d'autant plus forte que le tube s'éloignait davantage d'être capillaire.

Grandi eut recours à une boîte immergée à une profondeur voulue et présentant un orifice étroit sur sa face exposée au courant; le poids d'eau qui pénétrait dans la boîte dans un temps donné représentait la vitesse; ce système ne pouvait conduire à des résultats bien exacts, parce que la boîte a nécessairement des dimensions assez considérables pour produire dans le liquide des remous et des variations de vitesse.

Castelli se servait d'un pendule à cadran; c'était une balle de plomb réunie par une tige rigide à son axe horizontal de rotation; la balle de plomb étant descendue à la profondeur du filet liquide dont on voulait connaître la vitesse v, recevait de ce liquide une poussée vers l'aval mesurée par kv^2, k étant un coefficient constant; elle était soumise d'autre part à l'action de son poids dans l'eau p; la résultante de ces deux forces faisait avec la verticale un angle α donné par :

$$\tang \alpha = \frac{Kv^2}{p} \quad \text{d'où} \quad v = \sqrt{\frac{p}{K} \tang \alpha}$$

la tige du pendule se plaçait précisément de manière à faire l'angle α avec la verticale; donc, en tarant à l'avance l'instrument pour déterminer la constante $\left(\frac{p}{K}\right)$, la mesure de l'angle α donnera la valeur de la vitesse.

Le tachomètre de Brünings repose sur le même principe; une plaque métallique guidée horizontalement est exposée au courant; l'extrémité d'aval de la tige qui la guide est reliée par une ficelle à une poulie horizontale qu'elle quitte pour devenir verticale et aboutir à l'extrémité d'une balance dite romaine; on dispose le contre-poids mobile de cette balance de telle sorte que la plaque exposée au courant reste immobile et le fléau de la romaine horizontal. Si l'on désigne alors par d la distance du contre-poids p de la romaine, à son axe d'oscillation, par V la vitesse du liquide par l, la longueur fixe du bras de la romaine sur lequel la ficelle agit, la pression exercée sur la plaque est de kv^2 et elle est transmise à la romaine. Celle-ci se trouvant en équilibre, les moments des efforts exercés à ses deux extrémités sont égaux et l'on a :

$$Kv^2.l. = pd \quad \text{ou} \quad v = \sqrt{\frac{p.d}{K.l}} = A\sqrt{d}.$$

La lecture de la distance *d* suffit, lorsque l'appareil est taré, pour donner la valeur de la vitesse.

Mais il n'y a que deux appareils qui soient entrés réellement dans le domaine de la pratique ; le moulinet de Woltmann et le tube de Pitot perfectionné par Darcy.

Moulinet de Woltmann. — On trouvera dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1847, 1858 et 1860, un mémoire très-complet de M. l'ingénieur Baumgarten, et des notes intéressantes de MM. les ingénieurs Laterrade et Léveillé sur l'appareil qui nous occupe en ce moment.

La théorie mécanique complète du moulinet de Woltmann a été faite par M. Baumgarten.

Les figures 4, 5, 6 de la planche B, représentent un moulinet de Woltmann : il se compose des pièces suivantes :

a,a' quatre ailettes montées sur deux bras en croix et inclinées à 45° sur l'arbre horizontal de ces bras ; ces ailettes frappées obliquement par le courant se mettent à tourner et entraînent avec elles l'arbre horizontal *b* ;

b arbre horizontal qui porte une vis sans fin et qui tourne entre deux colliers fixes ; la vis sans fin engrène avec la roue R dentée et graduée ; cette roue marque le nombre de tours de 0 à 50 ;

A la roue R est accolé un pignon de 5 dents qui engrène avec la roue R', graduée elle aussi et portant 50 dents ; la roue R' marque les dizaines de tours de 0 à 50 dizaines. L'appareil permet donc de compter 550 tours de moulinet ;

Les roues RR' sont portées par une armature *d.d'* qui peut osciller autour du goujon horizontal *d*, et qui est manœuvrée de la surface de l'eau par un fil de laiton *c* ; lorsqu'on veut engrener la roue R et la vis sans fin, on tire sur le fil de laiton pour vaincre la résistance du ressort à boudin *s* et de la feuille du ressort *r* ; lorsque l'expérience est terminée, il suffit de lâcher le fil de laiton et la communication de mouvement cesse entre la vis et la roue dentée. Ainsi, il est facile de compter le nombre de tours de l'appareil dans un temps donné.

Le moulinet est fixé au manchon *l* qui porte à l'aval un gouvernail *g*, plaque verticale qui force l'appareil à se mettre toujours dans le fil du courant ;

Le manchon *l* est mobile sur le manchon *m* qui, lui, peut parcourir la tige verticale *nn* et être fixé, au moyen de la vis V, en un point quelconque de cette tige, c'est-à-dire à une profondeur déterminée du courant ; la tige métallique *nn* est appuyée sur le fond de la rivière et placée entre deux batelets réunis par un appontement, de sorte que la manœuvre est bien facile ;

La vis de pression inférieure V' sert à fixer à l'occasion la culasse *l* du moulinet sur le manchon *m*.

Sans faire la théorie complète du moulinet, on peut en calculer le mouvement d'une manière simple :

Soit s la surface d'une ailette, r la distance de son centre à l'axe, ω la vitesse angulaire de rotation de l'arbre, n le nombre de tours à la seconde ; cherchons la valeur de la composante de la vitesse du liquide normale à l'ailette, l'angle de l'ailette avec l'arbre étant égal à α : si v est la vitesse du liquide, sa composante normale à l'ailette est $v\sin\alpha$, mais cette ailette est animée normalement à l'arbre, c'est-à-dire transversalement au courant, d'une vitesse de circulation ωr dont la composante normale à l'ailette est $\omega.r.\cos\alpha$.

Le liquide ne frappe donc l'ailette qu'avec une vitesse relative égale à $(v\sin\alpha - \omega r\cos\alpha)$, et la pression normale à l'ailette est exprimée par

$$K.s.(v\sin\alpha - \omega.r.\cos\alpha)^2;$$

le moment de cette pression par rapport à l'arbre du moulinet est donc :

$$K.s.(v \sin \alpha - \omega r \cos \alpha)^2.r \cos \alpha$$

et, pour avoir le moment total il faudrait multiplier cette quantité par le nombre des ailettes.

Lorsque le moulinet a atteint une rotation uniforme, le moment de la poussée de l'eau est égal au moment des résistances passives.

On admet que les résistances passives sont constantes ou, tout au moins, varient proportionnellement à la poussée de l'eau sur les ailettes, de sorte qu'on arrive à l'équation :

$$K.s.(v. \sin \alpha - \omega.r. \cos \alpha)^2.\ r.\ \cos \alpha = A + k.s\ (v \sin \alpha - \omega.r.\ \cos \alpha)^2,$$

laquelle peut se mettre tout simplement sous la forme :

$$v \sin \alpha - \omega.r.\ \cos \alpha = \text{constante } C;$$

ou plus simplement encore, si on remarque que ω est proportionnel au nombre de tours n

$$(1) \qquad v = \alpha + \beta.n.$$

M. Baumgarten, exprimant les frottements en raison de la pression de l'eau, tenant compte de la résistance des bras et faisant varier r avec les éléments de l'ailette est arrivé à la formule plus complexe :

$$(2) \qquad v = \alpha.n + \sqrt{\beta n^2 + \gamma}.$$

Enfin d'Aubuisson avait posé la formule simple

$$(3) \qquad v = \alpha.n.$$

Mais cette dernière formule (3) doit être rejetée comme conduisant à des résultats peu exacts.

Reste à choisir entre les formules (1) et (2) :

La formule de M. Baumgarten a contre elle sa complication; pour les vitesses fortes et pour les vitesses moyennes elle ne donne pas de meilleurs résultats que la formule linéaire (1) ; mais, pour les vitesses faibles, la formule de Baumgarten est préférable, la relation qui lie les vitesses et les nombres de tours n'est plus représentée par une ligne droite, mais par une courbe que l'on peut toujours construire en tarant l'instrument.

Le moulinet ordinaire de Woltmann cesse du reste de fonctionner régulièrement lorsque la vitesse n'est pas capable de lui faire faire plus de deux tours par seconde.

M. Baumgarten a perfectionné cet appareil et l'a rendu beaucoup plus sensible en substituant aux ailettes planes des ailettes hélicoïdales arrivant jusqu'à l'arbre de rotation; ainsi modifié, l'appareil fonctionne convenablement tant que la vitesse de l'eau est capable de lui faire faire plus de trois dixièmes de tours à la seconde.

Avant de se servir d'un moulinet, il faut le graduer ou le tarer, c'est-à-dire

construire la ligne droite ou la courbe qui donne la relation entre les vitesses de l'eau et les nombres de tours à la seconde.

La graduation s'effectue en promenant le moulinet dans une eau stagnante avec des vitesses différentes : on plante sur la rive deux jalons espacés de 100 mètres, par exemple, et on fait haler la barque qui porte l'instrument suivant une ligne parallèle à la ligne des jalons ; avec une montre à secondes ou avec un pendule d'un mètre, on compte le nombre de secondes que l'on met à franchir la distance des jalons ; on a donc la vitesse de translation de l'appareil ou bien la vitesse relative de l'eau par rapport au moulinet. On obtient d'autre part le nombre de tours effectués par le moulinet.

En répétant l'expérience à des vitesses variables, on détermine les coefficients de la formule empirique ou bien on trace la courbe représentative.

Anémomètre. — L'anémomètre, destiné à mesurer la vitesse du vent, est presque identique au moulinet de Woltmann. On trouvera la description de l'anémomètre de M. Combes dans le tome XIII, 3e série, des *Annales des Mines*.

Tube de Pitot. — Le tube de Pitot a été mis par Darcy sous une forme pratique. Ce savant inspecteur général des ponts et chaussées a décrit son appareil dans une note insérée aux *Annales* de 1858, note que nous allons reproduire.

Pitot fit en 1732, à l'Académie des sciences, une communication qui parut intéresser cette assemblée : il lui présenta un appareil destiné à mesurer en un point donné la vitesse d'un des filets fluides dont un courant se compose. Cet appareil lui permit d'entrevoir un fait qui s'explique facilement aujourd'hui, mais que l'on contestait alors sous l'inspiration d'une théorie inexacte, savoir : que la vitesse de l'eau décroissait en se rapprochant du fond ou des rives.

L'appareil de Pitot consistait en une longue tringle en bois, de section triangulaire, dans l'une des faces de laquelle étaient logés deux tubes en verre ; l'un de ces tubes était horizontalement recourbé à son extrémité inférieure ; l'autre, au contraire, descendait verticalement jusqu'au niveau de la partie recourbée du premier.

L'opinion de Pitot était que son appareil exposé au courant de l'eau donnerait, par la différence de niveau existant entre les colonnes d'eau logées dans les deux tubes, la hauteur due à la vitesse du fluide au point que l'on considérait, et qu'il serait facile, dès lors, de déduire la vitesse cherchée au moyen de la relation $V^2 = 2gh$, h étant la différence observée.

« L'idée de cette machine est si simple et si naturelle, dit Pitot, que, dès qu'elle me fut venue, je courus sur-le-champ à la rivière pour en faire un premier essai avec un tube de verre simple, et l'effet répondit parfaitement à mon attente. Après ce premier essai, je ne pouvais pas m'imaginer qu'une chose aussi simple, et en même temps très-utile, eût pu échapper à tant d'habiles gens qui ont écrit et travaillé sur le mouvement des eaux.

« J'ai fait depuis toutes les recherches qu'il m'a été possible dans les traités que j'ai pu trouver sur l'hydraulique et le mouvement des eaux, pour voir si absolument personne n'en avait parlé et si mon idée était nouvelle. »

L'idée était, en effet, ingénieuse et neuve, et l'on peut comprendre la satisfaction qui se révèle dans ces lignes ; mais comment se fait-il que l'appareil qui résumait cette invention n'ait jamais été appliqué par les ingénieurs ? Comment se fait-il que le tube de Pitot ait été considéré comme une pure spéculation dont la pratique ne pouvait tirer aucun parti ? Comment se fait-il que pour obtenir la vitesse moyenne d'un cours d'eau on ait toujours eu recours de préférence, soit à des flotteurs verticaux de longueur égale à la lame d'eau

dont on veut mesurer la vitesse moyenne, soit au moulinet de Woltmann, soit enfin à d'autres appareils plus ou moins compliqués, et qui d'ailleurs offrent l'inconvénient d'exiger l'emploi d'un *compteur à secondes?*

C'est ce que je vais chercher à expliquer, en montrant en même temps qu'avec certaines modifications il est possible de rendre le tube de Pitot un instrument très-exact, très-pratique.

Je joins, en effet, à cette note, le dessin d'un instrument fondé sur le même principe (planche B, fig. 7), et qui sert depuis trois années à obtenir les vitesses des filets fluides dans des canaux expérimentaux de toutes formes. On pourra juger ainsi de la facilité et de la précision avec lesquelles le nouvel appareil permet d'opérer.

L'appareil de Pitot, réduit à sa plus simple expression théorique, pourrait être formé d'un seul tube en verre, horizontalement recourbé à son extrémité; l'eau qui pénètre par la partie horizontale exposée au courant se tient en équilibre dans le tube vertical à une hauteur au-dessus de la surface du courant égale à $h = \frac{V^2}{2g}$, V étant la vitesse du filet fluide que l'on considère. Lorsque l'on est placé dans des circonstances qui permettent de mesurer exactement h, on déduit, en effet, V de cette hauteur avec une précision très-suffisante.

Mais, en général, le clapotement de l'eau contre la surface extérieure du tube et son armature ne permet point de comparer le niveau de l'eau dans le tube à celui de la surface du courant, troublée par la présence de l'appareil; les ondulations qui courent toujours à la surface suffiraient, d'ailleurs, pour rendre bien difficile la mesure précise du niveau de cette surface.

C'est pour éviter cette difficulté, que Pitot avait sans doute appréciée dans les premières expériences qu'il fit pour juger de la valeur de son appareil, qu'il ajouta le second tube vertical dont l'extrémité inférieure trempait dans le courant.

Pitot croyait que le niveau de l'eau dans le tube droit devait être égal à celui de la surface du courant, et qu'ainsi la différence de niveau ou h, hauteur due à la vitesse, pourrait être facilement obtenue.

Il y avait là une première erreur : lorsque l'on plonge un tube droit dans un courant, l'eau dans le tube se tient en contre-bas de la superficie du courant d'une quantité en rapport constant avec le carré de la vitesse du filet fluide qui passe sous son orifice inférieur; ainsi la différence h entre le niveau de l'eau dans les tubes représente une quantité supérieure à la hauteur due à la vitesse réelle du filet fluide considéré.

Il y avait donc là une cause d'inexactitude que Pitot n'avait pas pressentie.

En second lieu, les oscillations étaient très-fortes dans des tubes ainsi disposés: d'autant plus fortes que les orifices avaient tout le diamètre des tubes, et que même on croyait nécessaire de disposer ces orifices en forme d'entonnoir.

On voit donc aisément pourquoi le tube de Pitot ne pouvait rendre aucun service pratique. D'abord sa construction reposait sur une erreur de principe; ensuite les oscillations qui avaient lieu dans les tubes ne permettaient pas d'apprécier, principalement dans les vitesses faibles, les différences de niveau cherchées.

Voici maintenant en quoi consistent les modifications que j'ai cru devoir introduire dans cet appareil, modifications qui en rendent l'application très-facile.

Des expériences multipliées et précises m'ont fait reconnaître que si dans une eau courante, en un point quelconque du fluide animé d'une vitesse V, on place

un tube vertical recourbé horizontalement, et dont l'orifice soit disposé d'abord contre le courant, ensuite dans le sens de ce dernier, enfin rectangulairement à sa direction, il existait un rapport constant entre la hauteur théorique $\frac{V^2}{2g}$ due à la vitesse du filet que l'on considère et les quantités h', h'', h'''; h' représentant, dans le premier cas, la hauteur dont le niveau s'élève dans la branche verticale au-dessus de la surface du courant; h'' et h''' les quantités dont le niveau s'abaisse au-dessous de la surface du même courant dans les deux autres hypothèses.

On pourra donc poser :

$$\frac{V^2}{2g}=mh',\quad \frac{V^2}{2g}=m'h'',\quad \frac{V^2}{2g}=m''h'''$$

Combinant soit la première et la deuxième, soit la première et la troisième de ces équations, il viendra donc :

$$V=\sqrt{\frac{mm'}{m+m'}}\sqrt{2g(h'+h'')}=\mu\sqrt{2g(h'+h'')},$$
$$V=\sqrt{\frac{mm''}{m+m''}}\sqrt{2g(h'+h''')}=\mu'\sqrt{2g(h'+h''')}.$$

Cherchant maintenant dans les tables les vitesses correspondant aux hauteurs $h'+h''$, $h'+h'''$, on trouvera des vitesses V' et V'', les équations ci-dessu deviendront donc :

$$V=\mu V',$$
$$V=\mu V'',$$

et les coefficients de tarage se détermineront pour chaque nature d'orifices à l'aide de quelques expériences.

On voit d'abord, par ce moyen, que l'on n'a pas besoin de passer, pour déterminer la vitesse cherchée, par la connaissance du niveau de la surface du liquide dans lequel l'appareil est plongé.

Ensuite j'ai fait disparaître presque entièrement les oscillations dans les tubes, en ne donnant aux orifices qu'un diamètre d'un millimètre et demi, tandis que celui des tubes est d'un centimètre.

Enfin, comme ces oscillations, quelque réduites qu'elles soient, pourraient encore contrarier l'observateur, j'ai fait placer un robinet au moyen duquel on peut fermer simultanément les orifices inférieurs des tubes; ces orifices étant fermés, toute communication est interceptée avec le courant, et l'on peut lire sur les tubes la différence d'où l'on déduit la vitesse avec autant de facilité et de précision que des hauteurs cotées sur une mire.

Le tube jaugeur tel que je l'ai fait exécuter offre encore une modification importante.

On sait que la plupart des instruments hydrométriques présentent le grave inconvénient d'altérer, par la perturbation qu'ils causent à la masse fluide, la vitesse qu'ils ont pour objet de mesurer. Il fallait donc diminuer la masse du tube jaugeur, puis éloigner autant que possible de la règle qui porte les tubes les orifices par lesquels s'introduit le filet fluide dont on veut déterminer la vitesse.

Pour arriver à ce double résultat, j'ai fait couper en biseau la règle de bois

de faible épaisseur dans laquelle sont encastrés les tubes; ensuite j'ai fait ajuster, sous les tubes en verre, des tubes en cuivre, de très-faibles diamètres, à l'extrémité desquels sont placés les ajutages.

Ces tubes peuvent avoir jusqu'à $0^m,80$ de longueur; dans l'instrument que le dessin représente, instrument destiné au jaugeage des rivières, cette longueur est de $0^m,15$ seulement. On voit qu'ainsi l'eau n'est que très-insensiblement troublée au point où l'on prend la mesure de sa vitesse.

Mais on se demandera comment pourront être mesurées les vitesses de superficie ou même de toute la couche liquide d'épaisseur égale à celle des tubes de cuivre à travers les parois desquels on ne saurait apercevoir le liquide. Voici le procédé que j'ai employé pour parvenir au résultat : les deux tubes en verre communiquent entre eux, à leur partie supérieure, par un tube en cuivre qui leur est hermétiquement ajusté; sur ce tube en cuivre est placé un robinet qui, suivant qu'il est ouvert ou fermé, met les tubes en communication avec l'atmosphère, ou fait cesser cette communication.

Au-dessus du robinet précité, est placée une petite embouchure, au moyen de laquelle on pratique un vide imparfait par aspiration : l'eau monte dans les tubes en verre à la hauteur que l'observateur désire, et s'y maintient par la fermeture du robinet qui interrompt la communication avec l'atmosphère.

Le robinet supérieur présente encore l'avantage de permettre de déterminer, avec un instrument d'une hauteur bien moindre que la profondeur du courant, la vitesse de ce dernier à *une profondeur quelconque* : il suffit pour cela de fermer ce robinet; on descend alors l'instrument à 1, 2, 3 mètres sous l'eau, au moyen d'une tringle en fer, à laquelle il est ajusté de manière à conserver sa mobilité autour d'un axe vertical, de telle façon qu'à l'aide d'un gouvernail l'orifice de la partie horizontale du tube de Pitot est toujours dirigé contre le courant.

L'instrument agit, dans le premier cas, sous un air dilaté; il fonctionne sous un air plus ou moins comprimé dans la deuxième hypothèse; mais il est évident que dans les deux cas les différences de niveau entre les tubes sont les mêmes que si l'on opérait sous l'influence de la pression atmosphérique.

Je terminerai ces considérations générales par une instruction sommaire relative à l'usage du tube jaugeur.

L'instrument réduit à ses parties essentielles se compose, ainsi qu'il résulte des détails précédents, de deux tubes en verre, accolés, communiquant chacun avec un ajutage placé à la partie inférieure (planche B, fig. 7). L'un de ces ajutages a est horizontal, et son orifice est tourné dans le sens du courant; l'autre a' est fixé dans une direction perpendiculaire. Un robinet B, commun aux deux tubes, permet de supprimer et de rétablir au besoin la communication avec les ajutages; un second robinet A, placé à la partie supérieure, permet de supprimer et de rétablir la communication avec l'air extérieur.

Lorsque l'on plonge l'instrument dans un courant, les deux robinets étant ouverts et l'ajutage horizontal dirigé contre le courant, l'eau s'élève dans le tube correspondant à cet ajutage au-dessus de la surface générale du courant, et s'abaisse au contraire au-dessous dans l'autre tube.

Si l'on désigne par h la différence de niveau dans les deux tubes, par $2g$ la constante 19,62, et par μ un coefficient variable avec la forme des ajutages, la vitesse du courant est égale à $\mu\sqrt{2gh}$: le coefficient μ est égal à 0,84 [1], lorsque les deux ajutages sont dirigés à angle droit.

[1] Dans les premiers instruments exécutés par M. Salleron, ce constructeur, au lieu de placer

L'observation se ferait difficilement près de la surface du courant ; le robinet A permet de remédier à cet inconvénient en déplaçant à volonté les deux colonnes liquides à observer ; à l'aide du tuyau d'aspiration placé à la partie supérieure de l'instrument, on raréfie l'air contenu dans les tubes de manière à faire monter les deux colonnes liquides à une hauteur commode pour la lecture, puis on referme le robinet supérieur. On peut alors faire l'observation sans aucune difficulté; on peut même, si cela est nécessaire, fermer le robinet inférieur, de manière à conserver l'eau immobile dans les tubes, et retirer l'instrument pour faire la lecture à loisir.

Les précautions à prendre pour faire une bonne observation sont les suivantes[1] :

1° S'assurer que les ajutages ne sont ni bouchés ni faussés ; une circonstance, en apparence peu importante, peut faire varier notablement le coefficient μ ; il faut avoir soin que les branches qui portent les ajutages soient parfaitement horizontales et perpendiculaires à l'axe de l'instrument.

2° Fixer l'instrument sur une tringle à l'aide de la douille et de la vis de pression, et y adapter, quand il y a lieu, le gouvernail à la partie inférieure.

3° Maintenir l'instrument, lorsqu'il est plongé, dans une position parfaitement verticale ; il est bon d'y ajouter un petit fil à plomb.

4° Attendre, avant de faire la lecture, que le niveau des deux colonnes liquides soit devenu sensiblement constant, ou du moins ne fasse plus que des oscillations régulières ; fermer alors le robinet inférieur, afin de rendre le niveau immobile, et faire la lecture sur l'échelle placée entre les deux tubes.

5° Répéter trois ou quatre fois la même observation et prendre la moyenne des résultats obtenus.

EXEMPLE.

HAUTEURS DANS LE TUBE.		DIFFÉRENCES.
AMONT.	AVAL.	
mètres.	mètres.	mètres.
0.952	0.840	0.112
0.946	0.831	0.115
0.939	0.825	0.114
0.931	0.817	0.114
	Moyenne. . . .	0.114

D'où l'on conclut pour la vitesse V du courant, le coefficient K étant égal à 0,84 pour les ajutages dirigés à angle droit.

$$V = 0,84 \sqrt{19,62 \times 0,114} = 1^m,25.$$

rectangulairement aux tubes en verre les portions de tubes en cuivre qui portent les ajutages, avait fait faire à ces derniers nn angle un peu aigu ; je les ai fait replacer rectangulairement par une légère pression de la main. C'est à cette disposition que correspond le coefficient $\mu = 0.84$.

Du reste, le coefficient μ varie avec la forme des ajutages et leur disposition. J'ai obtenu $\mu = 1$ dans l'instrument qui me sert aux expériences sur les canaux rectangulaires ; dans ce cas, l'ajutage du tube d'aval ne faisait point saillie sur le tube en cuivre dont la paroi était simplement percée d'un trou d'environ $0^m,0015$ de diamètre.

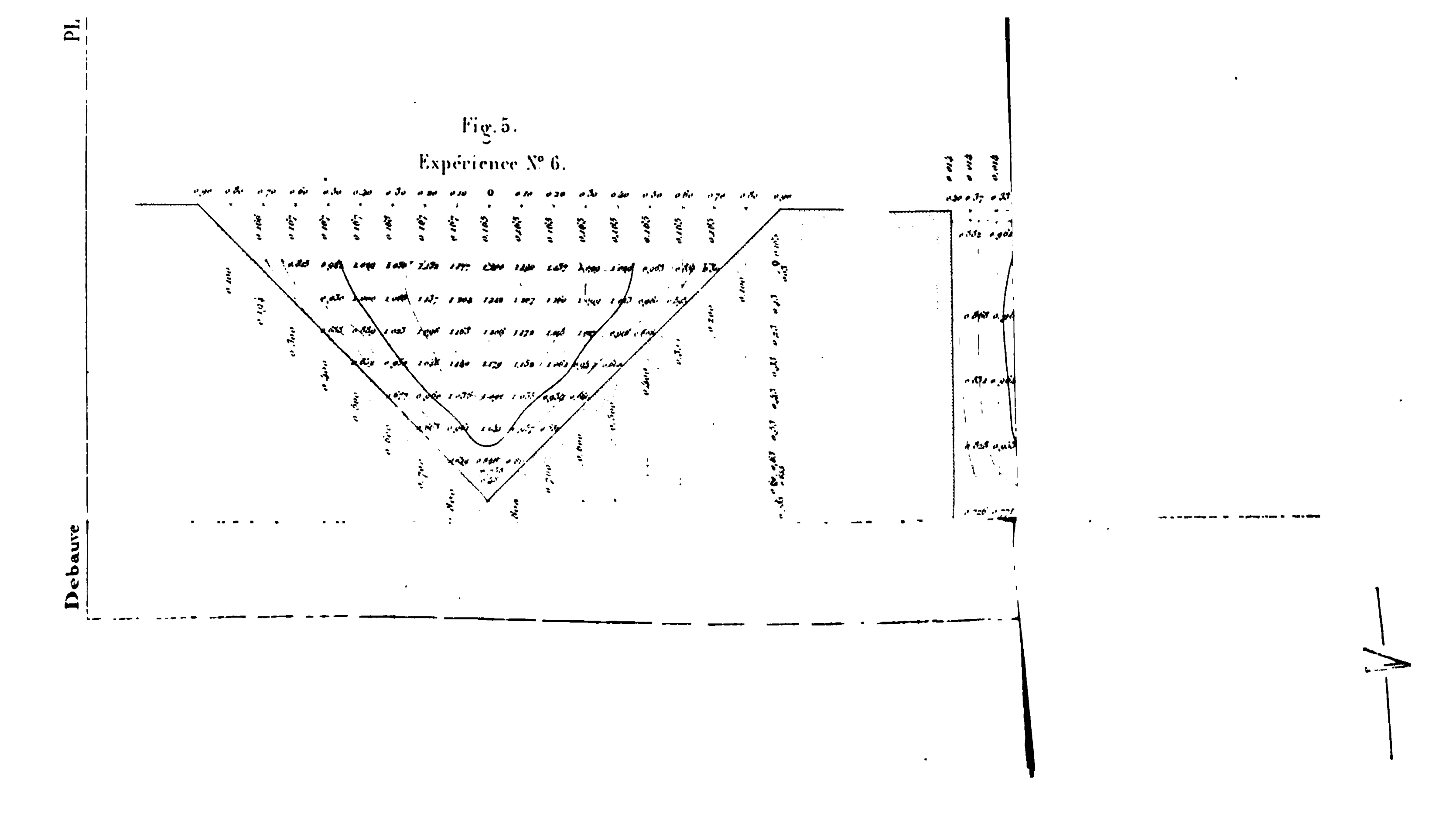
[1] Elles m'ont été indiquées par M. l'ingénieur Bazin et par M. le conducteur Chapuis, qui, depuis trois années, font usage du tube jaugeur.

Les explications précédentes supposent que la partie inférieure de l'instrument est seule plongée; mais l'observation se ferait de la même manière si la profondeur du courant était assez grande pour que l'instrument fût tout entier sous l'eau; dans ce cas, il faut avant de le plonger fermer le robinet supérieur; lorsqu'il est à une certaine profondeur, l'eau s'élève dans les deux tubes en comprimant l'air qu'ils renferment.

Dès qu'on juge que le niveau de l'eau des tubes est devenu invariable, on ferme le robinet inférieur, et l'on retire l'instrument pour faire la lecture comme dans le premier cas. Il est facile de voir qu'un pareil instrument s'appliquerait aisément à la mesure du sillage des navires.

FIN

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.


Fig. 5.
Expérience N° 6.



MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES
AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE
INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

16me FASCICULE — TEXTE

TRAITÉ DES EAUX
2e PARTIE
Distributions d'eau
AVEC 15 PLANCHES

PARIS
DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES
49, QUAI DES AUGUSTINS, 49
1875

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE II.

Quantité et qualité des eaux.

CHAPITRE III.

Sources et puits.

CHAPITRE IV.

Distributions d'eau par dérivation.

CHAPITRE V.

Distributions d'eau par machines élévatoires.

CHAPITRE VI.

Éléments d'une distribution d'eau.

CHAPITRE VII.

Égouts.

APPENDICE

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

TRAITÉ DES EAUX

DEUXIÈME PARTIE

DISTRIBUTIONS D'EAU — ÉGOUTS

INTRODUCTION

L'eau est nécessaire à tous les besoins de la vie; c'est une œuvre éminemment philanthropique que de la mettre à la portée de tous et particulièrement à la portée des ouvriers et des pauvres.

Un grand écrivain, dit Arago, appelait la propreté une vertu. Un voyageur célèbre disait qu'il avait pu, presque partout, juger du degré de civilisation des peuples par leur propreté. Si vous introduisez de l'eau à bon marché dans la maison de l'ouvrier, si vous la faites parvenir jusqu'aux étages supérieurs où il réside et souffre, vous aurez rendu un immense service à la population.

L'eau n'est pas moins nécessaire à la salubrité des villes qu'à la santé des hommes. Quand une eau abondante parcourt chaque jour les ruisseaux de toutes les rues, elle entraîne les débris organiques et les ferments de corruption, elle purifie l'air et le sol.

L'intérêt même de la conservation des monuments veut qu'en tout point on puisse trouver une quantité d'eau suffisante pour éteindre un incendie, quelque important qu'il soit, et l'empêcher d'étendre ses ravages à tout un quartier.

Enfin, si l'on dispose d'une quantité d'eau considérable et qu'elle possède une pression suffisante, qui empêche de distribuer à domicile le travail mécanique et de le substituer dans les moindres métiers au travail musculaire de l'homme?

Les Romains s'étaient préoccupés d'amener des eaux courantes au sein de leurs

cités et les vestiges gigantesques de leurs ouvrages témoignent de l'importance qu'ils attachaient à cette question.

En France, les premières tentatives de distribution ne datent que de Louis XIV et elles n'avaient pour but que l'embellissement de la demeure royale. Ce n'est guère qu'au commencement de ce siècle qu'on s'est préoccupé d'assurer l'alimentation de Paris. Depuis lors, presque toutes les grandes villes se sont imposé des sacrifices pour se procurer des eaux abondantes. Néanmoins il reste beaucoup à faire; nombre de villes, de plus ou moins grande importance, sont encore privées d'eau, bien qu'il leur soit possible d'en obtenir à peu de frais.

L'étude des distributions d'eau présente donc une importance capitale. Nous diviserons cette étude en sept chapitres :

1er *Chapitre*. Recherche des lois du mouvement de l'eau dans les tuyaux; formules pratiques.
2e — Quantité et qualités des eaux. — Procédés de filtrage.
3e — Puits artésiens. — Sources naturelles et artificielles.
4e — Distribution d'eau par dérivation.
5e — Distribution d'eau par machines élévatoires.
6e — Éléments d'une distribution d'eau.
7e — Égouts.

Les égouts sont le corollaire obligé d'une distribution d'eau ; car, s'il est avantageux de répandre à profusion l'eau pure et limpide, il ne l'est pas moins d'emmener loin des habitations les déjections des villes et toutes les eaux chargées d'immondices et de détritus.

La distribution d'eau et le système d'égouts se complètent donc l'un par l'autre et constituent la circulation complète d'une ville, comme le système artériel et le système veineux constituent la circulation animale : le premier porte en tous les points du corps le sang rouge et pur qui répare les pertes de l'organisme, l'autre ramène le sang noir aux poumons qui le revivifient [1].

[1] Sur les conseils de l'éditeur, nous avons fait pour certaines parties de ce traité de larges emprunts à l'excellent ouvrage de Darcy intitulé : *Fontaines de Dijon*. — Cet ouvrage, aujourd'hui épuisé, renferme beaucoup de considérations et de résultats pratiques qu'il était utile de reproduire.

CHAPITRE PREMIER

MOUVEMENT DE L'EAU DANS LES TUYAUX — FORMULES PRATIQUES

Répartition des vitesses dans la section transversale d'un tuyau. — Considérons un tuyau de longueur quelconque, mais de section constante, en communication avec un réservoir à niveau invariable. Quand l'eau pénètre dans le tuyau, elle s'avance irrégulièrement en chassant l'air, dont elle prend la place; puis, lorsque tout l'air a disparu, le régime permanent commence.

Ce régime est non-seulement permanent, mais encore uniforme; la vitesse moyenne dans une section transversale est partout la même, puisqu'il ne peut se produire de vide, de solution de continuité dans le courant liquide; la quantité d'eau qui passe pendant l'unité de temps dans une section transversale du tuyau est indépendante de la position de la section. Ainsi la vitesse moyenne est la même pour toutes les sections.

Mais les vitesses de tous les filets liquides qui traversent une section sont-elles les mêmes et égales à la vitesse moyenne? Non, les filets voisins des parois sont retardés dans leur mouvement et le retard diminue à mesure qu'on s'approche du filet central, de sorte que la vitesse de celui-ci est supérieure à la vitesse moyenne, tandis que la vitesse des filets pariétaux est inférieure à la vitesse moyenne.

Il est facile de reconnaître par une expérience bien simple l'existence d'une force retardatrice au contact des parois : prenez un tuyau de diamètre constant et de longueur variable, débouchant toujours à la même hauteur dans l'atmosphère et alimenté par un réservoir à niveau constant, la charge du liquide sur l'orifice de sortie sera toujours la même, quelle que soit la longueur du tuyau; si la vitesse moyenne ne dépendait que de cette charge, le débit serait constant; au contraire, si la vitesse est réduite par la résistance des parois, elle doit diminuer à mesure que la surface frottante augmente; le débit diminue, en effet, à mesure que la longueur du tuyau augmente.

Ainsi, la résistance à la paroi existe et, si dans l'expérience précédente on mesure les débits, on reconnaît que cette résistance augmente proportionnellement à la surface des parois mouillées, c'est-à-dire proportionnellement à la longueur du tuyau.

Cela posé, voici comment on peut comprendre la répartition des vitesses dans une section transversale du tuyau.

Divisons cette section en une série de surfaces annulaires comprises entre le centre et la circonférence intérieure du tuyau, la vitesse maxima sera au centre,

la vitesse minima à la périphérie et la vitesse ira croissant à mesure qu'on passera à une surface annulaire de plus grand rayon.

Le mouvement des divers éléments annulaires qui composent la masse liquide peut donc se comparer à celui des tubes d'un télescope emboîtés les uns dans les autres.

On a cherché à déterminer par l'expérience la répartition des vitesses ; cette recherche est difficile, eu égard aux appareils en usage pour la mesure des vitesses ; cependant, on a pu vérifier que les faits se passent comme nous venons de l'indiquer tout à l'heure.

La couche liquide en contact avec les parois est retardée, à son tour elle retarde la suivante, qui retarde la troisième et ainsi de suite ; si l'on connaissait les forces élémentaires dues à la cohésion et à la viscosité, on pourrait aborder par le calcul la question de répartition des vitesses.

Malheureusement, il n'en est rien ; c'est pourquoi nous ne reproduirons pas dans cet ouvrage purement pratique l'étude théorique de la répartition des vitesses.

On la trouvera dans le *Traité d'hydraulique* de M. Bresse et dans le remarquable mémoire de M. l'ingénieur Maurice Lévy, intitulé : *Théorie d'un courant liquide.*

M. Bresse arrive aux conclusions suivantes :

Les vitesses décroissent, à partir du filet central, comme les ordonnées d'un paraboloïde de révolution ayant même axe que le tuyau ;

Le filet qui possède la vitesse moyenne est toujours à une distance du centre comprise entre les $\frac{2}{3}$ et les 0,71 du rayon du tuyau ; c'est cette dernière proportion qui, vraisemblablement, se rapproche le plus de la vérité.

D'après M. Maurice Lévy, le filet animé de la vitesse moyenne est aux 0,689 du rayon, et l'on a entre la vitesse V_0 du filet central, la vitesse W à la paroi et la vitesse moyenne U, la relation :

$$U^2 = \frac{3V_0^2 + 4W^2}{7}$$

Lois et formules expérimentales du mouvement de l'eau dans les tuyaux. La résistance est proportionnelle à la longueur du tuyau. — Nous concevons un liquide parfait comme une réunion de molécules indépendantes les unes des autres ; le frottement des parois s'exerce sur chaque molécule comme si elle était seule ; la résistance qui en résulte est donc proportionnelle au nombre des molécules en contact avec les parois, c'est-à-dire proportionnelle à la surface frottante, ou encore à la longueur du tuyau, car on ne considère que des tuyaux à diamètre constant.

Il est du reste facile, comme nous l'avons vu plus haut, de reconnaître que la résistance augmente avec la longueur du tuyau : prenez un tuyau alimenté par un réservoir invariable et débouchant toujours au même niveau dans l'atmosphère, quoique de longueur variable, vous verrez le débit diminuer à mesure que la longueur augmentera et les diminutions de charge, qui mesurent les augmentations de résistance, sont proportionnelles aux accroissements de longueur.

La résistance est indépendante de la pression. — Dubuat et les hydrauliciens qui lui ont succédé avaient posé ce principe que la résistance opposée par les parois des tuyaux au mouvement des liquides est indépendante de la pression que leur fait supporter le liquide en mouvement. Ce principe paraît au premier

abord assez difficile à admettre, parce qu'on est porté à assimiler le frottement des liquides au frottement des solides. Cependant, si l'on réfléchit que les liquides sont incompressibles et que dans les solides au contraire le frottement est produit par la compression, par la pénétration des corps en contact, on reconnait en effet que l'indépendance des pressions et du frottement dans les liquides est parfaitement logique.

M. Darcy, dans ses expériences, a réalisé des pressions assez différentes entre elles et assez élevées pour qu'il fût possible de bien vérifier le principe de Dubuat.

Ainsi, il a fait varier de 17 à 26 mètres et de 22 à 40 mètres les pressions entre les deux parties des tuyaux soumises aux observations; néanmoins, les différences ou pertes de charges sont restées les mêmes pour les deux parties.

La même conséquence résulte d'une expérience directe dans laquelle les charges ont été portées de 18 à 41 mètres.

Ainsi, l'on peut admettre, sans erreur appréciable dans la pratique, que la résistance au mouvement de l'eau dans les tuyaux est indépendante de la pression.

En réalité, ce principe ne doit pas être vrai, car l'eau possède une certaine compressibilité; mais l'influence de la pression n'est sensible que pour des différences considérables dans les charges, différences qu'on ne réalise pas dans la pratique.

La résistance dépend de la nature des parois. — Longtemps on a considéré la résistance au mouvement des liquides dans les tuyaux comme indépendante de la nature des parois : on se disait que les parois, quelles qu'elles soient, sont recouvertes d'une mince pellicule immobile sur laquelle s'effectue le mouvement, de sorte que la paroi réelle n'agit pas. Les expériences de Darcy ont montré qu'il n'en était point ainsi, et que les rugosités des parois avaient sur l'écoulement une influence très-sensible, dont nous apprécierons plus loin la valeur.

La résistance dépend de la vitesse d'écoulement. — L'influence principale est due à la vitesse d'écoulement. C'est surtout la vitesse à la paroi qu'il faudrait considérer, mais nous ne connaissons pas la loi de décroissance des vitesses depuis le filet central jusqu'aux filets pariétaux. Il n'y a qu'une seule quantité que nous puissions apprécier exactement, c'est le quotient du débit par la section du tuyau; c'est ce qu'on appelle la vitesse moyenne.

Pour sortir d'embarras et pour établir une formule empirique, on a admis que la résistance était fonction, non pas de la vitesse centrale et de la vitesse à la paroi, mais uniquement de la vitesse moyenne.

Cette hypothèse est absolument fausse en théorie; néanmoins on la conserve dans la pratique, faute de mieux; elle conduit, du reste, à des formules empiriques qui concordent bien avec les résultats expérimentaux et qui rendent de précieux services.

En réalité, la résistance dépend de la vitesse de tous les filets liquides. On conçoit que la vitesse de chaque filet puisse être exprimée en fonction de la vitesse du filet central, de l'inclinaison du tuyau et de la distance qui sépare le filet considéré du filet central. De sorte que la résistance au mouvement serait exprimée par une fonction de la vitesse centrale, du rayon du tuyau et de sa pente.

Au lieu de cela, on considère seulement la vitesse moyenne et on cherche à relier par une formule empirique les variations de cette vitesse et les variations de la résistance.

Nomenclature des expériences sur l'écoulement dans les tuyaux. — De Prony, qui avait à sa disposition 51 expériences dues à Bossut, Couplet et Dubuat, calcula des tables pratiques qui furent longtemps en usage et qui le sont encore.

Mais elles doivent être abandonnées, malgré leur forme commode, parce qu'elles sont basées sur des expériences trop peu nombreuses et trop disparates.

L'ingénieur en chef d'Aubuisson, à qui l'on doit d'importants travaux hydrauliques, disait en 1829 : « Les formules de de Prony sont basées sur des expériences généralement faites avec de petits tuyaux, et elles se sont trouvées en défaut lorsqu'on les a appliquées aux grandes conduites. » Pour parer à cet inconvénient, d'Aubuisson rectifia les formules anciennes au moyen de quelques expériences nouvelles, mais les rectifications elles-mêmes ne reposaient point sur des bases indiscutables.

En présence de tant de résultats divers, n'était-il pas opportun d'entreprendre une série d'expériences nombreuses et variées, destinées à guider les constructeurs d'une manière certaine?

Darcy avait compris cette opportunité; ses fonctions lui permettaient de procéder à des expériences exactes, entreprises sur une grande échelle; nous en donnons plus loin une description sommaire.

FORMULE PRATIQUE FONDAMENTALE

La formule fondamentale du mouvement de l'eau dans les tuyaux est presque identique à celle du mouvement dans les canaux.

Désignons par : π la densité du liquide,
l la longueur du tuyau considéré,
ω et χ sa section et son périmètre,
d et r son diamètre et son rayon,
u la vitesse moyenne de l'eau qui le parcourt,
ζ la charge totale pour la longueur l, c'est-à-dire la différence de niveau entre le réservoir d'alimentation et l'extrémité de la conduite,

La résistance est proportionnelle à la surface des parois, c'est-à-dire au produit du périmètre χ par la longueur l; elle est proportionnelle en outre à une fonction inconnue de la vitesse moyenne, fonction que nous désignerons par $f(u)$.

Ainsi la résistance est exprimée par :

$$\chi . l . f(u)$$

D'un autre côté, le liquide, qui parcourt le tuyau, descend de la quantité ζ entre le sommet du réservoir et l'orifice extrême du tuyau; cette chute ou cette charge représente par unité de surface une pression π, ζ; sur la section entière du tuyau, c'est une force π, ζ, ω. Malgré l'existence de cette force, l'écoulement reste uniforme et ne s'accélère pas; la pression due à la charge est donc absorbée par la résistance. D'où résulte l'équation :

$$\pi . \zeta . \omega = \chi . l . f . (u)$$

Si l'on remarque que π est un nombre constant, et que le rapport $\frac{\omega}{\chi}$ est égal dans une section circulaire à $\frac{1}{4}d$, l'équation précédente peut se mettre sous la forme simple :

$$\frac{1}{4}d.j = F(u),$$

dans laquelle j est égal au rapport $\left(\frac{\zeta}{l}\right)$; c'est la perte de charge par unité de longueur du tuyau.

Il n'y a plus qu'à déterminer la forme de la fonction F.

Formule de de Prony. C'est à ce moment qu'on entre dans le système empirique.

De Prony avait adopté pour F(u) la forme

$$au + bu^2$$

et il avait reconnu que toutes les expériences dont il disposait pouvaient être contenues dans l'expression :

$$(1) \qquad \frac{1}{4}d.j = au + bu^2$$

pourvu qu'on donnât aux coefficients constants les valeurs :

$$\begin{cases} a = 0,0000\ 1733\ 14 \\ b = 0,0003\ 4825\ 90 \end{cases}$$

Ces valeurs montrent que, pour des vitesses de quelque importance, l'influence du carré de la vitesse est bien supérieure à l'influence du premier terme : on peut donc supprimer celui-ci dans les cas ordinaires de la pratique.

S'il s'agissait de tubes capillaires, le second terme au contraire disparaîtrait; c'est ce qui arrive, comme nous le verrons plus loin, lorsqu'on veut calculer le mouvement d'un courant liquide à travers un terrain sableux.

Il faut remarquer encore que les coefficients sont donnés avec un bien trop grand luxe de décimales. A quoi bon une telle complication lorsqu'on est à peine sûr de l'exactitude des deux ou trois premiers chiffres ? Cela ne peut servir qu'à inspirer une sécurité trompeuse ; il est de beaucoup préférable de prendre les formules pour ce qu'elles sont, pour des formules approchées destinées à fournir au constructeur non pas des dimensions précises et déterminées, mais des limites entre lesquelles il doit se renfermer.

Eytelwein modifia les coefficients de de Prony en tenant compte de la perte de charge qui se produit par la contraction de la veine lorsque le liquide pénètre du réservoir dans le tuyau ; il obtint de la sorte les chiffres suivants :

$$\begin{cases} a = 0,0000\ 222 \\ b = 0,000\ 28 \end{cases}$$

Formule monôme. — La formule binôme se prête assez mal aux transformations algébriques et aux calculs logarithmiques.

Aussi plusieurs auteurs ont-ils cherché à établir une formule monôme.

M. Barré de Saint-Venant, se servant des mêmes expériences que de Prony, a donné l'expression

$$\frac{1}{4} d.j = \alpha . u^{\beta}$$

dont les coefficients constants, α et β ont les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} \alpha = 0{,}000\ 295 \\ \beta = \frac{12}{7} \end{cases}$$

Cette expression n'a point passé dans le domaine pratique.

Formule monôme de Dupuit. — « La formule monôme, dit Dupuit, ne peut donner des résultats sensiblement différents de ceux de la formule binôme que pour les très-petites vitesses ; or, les erreurs que l'on peut commettre alors n'ont pas d'importance parce que le résultat obtenu, étant lui-même très-petit, n'est pas de nature à avoir de l'influence sur le parti à prendre. Que cherche-t-on en effet ? Ou un diamètre suffisant pour débiter un produit donné, avec une certaine charge, ou le produit que peut fournir un diamètre donné ou quelle charge est nécessaire, etc. Or, dans toutes ces questions, la vitesse ne saurait être très-petite, ou si elle l'était dans quelque partie du système de conduites, cette partie serait comme étrangère au résultat par rapport au reste. C'est ce qu'on reconnaîtra dès qu'on aura fait quelques applications des formules à un certain nombre de questions pratiques, et ce que nous ferons peut-être comprendre dès à présent en disant qu'il en est de ces formules comme de celles qui sont relatives à la résistance des matériaux ; leur exactitude n'est nécessaire que dans les flexions et les charges considérables ; peu importe au constructeur qu'une pièce de pont fléchisse d'une fraction plus ou moins grande de millimètre sous le pas d'un piéton ; ce qu'il a besoin de savoir, c'est la déformation qu'elle subira sous la charge de la plus lourde voiture, c'est enfin la charge qui en occasionnera la rupture ; de même, dans les distributions d'eau, ce qu'on cherche, c'est le maximum de débit, de perte de charge, qui n'arrivent que dans les grandes vitesses.

On ne doit donc pas hésiter à se servir de la formule monôme d'une manière exclusive dans la pratique, d'autant plus que la formule binôme n'est elle-même qu'une approximation, puisqu'elle suppose que tous les filets ont la même vitesse et que le frottement est indépendant de la nature de la paroi.

D'après ces considérations, M. Dupuit adopte la formule

$$d.j = \alpha . u^2,$$

qui, en remplaçant u par sa valeur $\frac{q}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}$, et la perte de charge j par son expression $\left(\frac{\zeta}{l}\right)$, peut s'écrire

$$\zeta = \beta \frac{lq^2}{d^5};$$

la quantité ζ est la hauteur totale dont l'eau descend depuis le niveau du réservoir jusqu'à l'orifice de la conduite.

Se servant des résultats expérimentaux connus, M. Dupuit trouva pour β le chiffre 0,0025, de sorte qu'il arriva définitivement à

(2) $$\zeta = \left(\frac{q}{20}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^5 \cdot l$$

Cette formule a été mise en tables qui donnent immédiatement les valeurs de $\left(\frac{q}{20}\right)^2$ et de $\left(\frac{1}{d}\right)^5$.

Les tables de Dupuit sont commodes et ont reçu des praticiens un accueil favorable.

Cependant on peut leur reprocher d'adopter pour le coefficient de la résistance un nombre constant, alors que les expériences de Darcy ont montré que ce coefficient devait varier avec le diamètre des tuyaux. Nous conseillons donc de préférence l'usage des tables que nous avons dressées d'après les expériences de Darcy et qu'on trouvera à la fin de ce volume.

Formule monôme de Darcy. — M. Darcy a rapporté dans vingt-deux tableaux les résultats des cent quatre-vingt dix-huit expériences qu'il a exécutées pour déterminer :

1° Les relations existant entre les pentes, les vitesses moyennes et les diamètres des conduites ;

2° Les pertes de charge nécessaires à la production des vitesses moyennes.

Il a montré que, contrairement à l'opinion précédemment admise, la nature et l'état des surfaces exercent une influence notable sur les produits des conduites.

En effet, les conduites en fer enduites de bitume donnent des produits plus considérables que ceux que l'on déduisait des formules de de Prony dans le rapport de 4 à 3 environ ; le verre offre des résultats analogues ; mais, en revanche, dans des conduites en fonte dont des dépôts, même légers, n'avaient diminué le diamètre que d'une faible quantité, la vitesse et, par suite, la dépense, se sont trouvées notablement inférieures à ce qu'indiquaient les formules de de Prony, tandis qu'après le nettoyage il y avait accord entre ces formules et l'expérience.

Quant au diamètre, M. Darcy a reconnu que les formules de de Prony ne lui assignaient pas une assez grande influence ; pour les petits diamètres, les débits expérimentaux sont inférieurs à ceux de ces formules, tandis que pour les grands diamètres ils leur sont supérieurs.

En ce qui touche les conduites en plomb de 14, 27 et 41 millimètres de diamètre, les formules anciennes sont d'accord avec les expériences nouvelles.

Suivant M. Darcy, si cette influence des diamètres avait paru à de Prony moins considérable qu'elle ne l'est réellement, cela tient à une sorte de compensation fortuite qui se sera établie entre la résistance des tuyaux de petit diamètre, mais bien polis, et celle des tuyaux de grand diamètre, mais souillés par des dépôts. M. Darcy a eu soin de comparer entre eux des tuyaux ayant leurs parois dans le même état.

Pour les petites vitesses, inférieures à $0^m,10$ par seconde, M. Darcy a montré que le terme relatif au carré de la vitesse dans les formules de résistance parait avoir si peu d'influence que la résistance devient sensiblement proportionnelle à la *simple vitesse*.

Ayant traduit graphiquement par des courbes les résultats de ses expériences, M. Darcy a reconnu les faits suivants :

1° La formule

$$\frac{1}{4}d.j = au + bu^2$$

exprime pour chaque tuyau la loi de la résistance, excepté pour les tuyaux de très-petit diamètre et pour les faibles vitesses ; alors, comme nous venons de le dire, la résistance est sensiblement proportionnelle à la simple vitesse.

2° En passant d'un diamètre à un autre pour une même nature de tuyaux, ou d'une espèce de tuyau à une autre, les valeurs des coefficients a et b des deux puissances de la vitesse ne restent pas les mêmes ; elles varient avec les surfaces lorsque ces dernières offrent des degrés de poli inégaux, et avec les rayons lorsque les surfaces sont au contraire à peu près identiques.

3° Pour des tuyaux recouverts de dépôts, comme cela arrive aux conduites qui servent depuis un certain temps, la résistance peut être considérée comme simplement proportionnelle au carré de la vitesse, ce qui simplifie l'expression et le calcul dans les applications.

Lorsqu'on se propose d'établir une canalisation, ce ne sont pas des tuyaux neufs à surface polie qu'il faut considérer dans les calculs, mais des tuyaux ayant déjà quelque temps de service, c'est-à-dire recouverts d'un dépôt plus ou moins épais.

Dans les applications, la formule monôme

$$\frac{1}{4}d.j = \beta.u^2$$

doit donc seule être appliquée.

Si l'on remplace le diamètre d par deux fois le rayon r et qu'on chasse la fraction $\frac{1}{2}$ du premier membre pour la faire entrer dans le coefficient constant du second membre, la formule pratique arrive à sa forme définitive

$$r.j = b_1u^2. \qquad (3)$$

Le tableau suivant renferme les valeurs de b_1, de $\left(\frac{b_1}{r}\right)$ et de $\left(\sqrt{\frac{r}{b_1}}\right)$ pour les tuyaux dont le diamètre est compris entre 0m,01 et 1 mètre ; il résume les expériences de Darcy sur les tuyaux en fonte neuve.

TABLEAU DES COEFFICIENTS DE RÉSISTANCE DES TUYAUX NEUFS EN FONT

NOMBRES b_1 DE LA FORMULE $rj = b_1 u^2$

DIAMÈTRES	RAYONS	COEFFICIENT b_1	VALEUR DE $\frac{b_1}{r}$	VALEUR D
0,01	0,005	0,001801	0,36020	1,6
0,02	0,01	0,001154	0,11540	2,9
0,027	0,0135	0,000986	0,073056	3,6
0,03	0,015	0,000938	0,062535	3,9
0,04	0,02	0,000850	0,041525	4,9
0,05	0,025	0,000765	0,030652	5,7
0,054	0,027	0,000746	0,027653	6,0
0,06	0,03	0,000722	0,024089	6,4
0,07	0,035	0,000691	0,019767	7,1
0,08	0,04	0,000668	0,016718	7,7
0,081	0,0405	0,000666	0,016463	7,7
0,09	0,045	0,000650	0,014461	8,3
0,10	0,05	0,000636	0,012728	8,8
0,108	0,054	0,000626	0,011607	9,2
0,11	0,055	0,000624	0,011357	9,3
0,12	0,06	0,000614	0,010247	9,8
0,13	0,065	0,000606	0,009331	10,3
0,135	0,067	0,000602	0,008931	10,5
0,14	0,07	0,000599	0,008563	10,8
0,15	0,075	0,000593	0,007910	11,2
0,16	0,08	0,000587	0,007348	11,6
0,162	0,081	0,000586	0,007245	11,7
0,17	0,085	0,000583	0,006860	12,0
0,18	0,09	0,000578	0,006432	12,4
0,19	0,095	0,000575	0,006053	12,7
0,20	0,10	0,000571	0,005717	13,2
0,21	0,105	0,000568	0,005415	13,5
0,216	0,108	0,000566	0,005249	13,8
0,22	0,11	0,000565	0,005143	13,9
0,23	0,115	0,000563	0,004897	14,2
0,24	0,12	0,000560	0,004674	14,6
0,25	0,125	0,000558	0,004470	14,9
0,26	0,13	0,000556	0,004282	15,2
0,27	0,135	0,000554	0,004110	15,5
0,28	0,14	0,000553	0,003951	15,9
0,29	0,145	0,000551	0,003804	16,2
0,30	0,15	0,000550	0,003667	16,5
0,31	0,155	0,000548	0,003540	16,8
0,32	0,16	0,000547	0,003421	17,0
0,325	0,1625	0,000546	0,003365	17,2
0,33	0,165	0,000546	0,003310	17,3
0,34	0,17	0,000545	0,003206	17,6
0,35	0,175	0,000543	0,003108	17,9
0,36	0,18	0,000542	0,003016	18,2
0,37	0,185	0,000541	0,002929	18,4
0,38	0,19	0,000541	0,002847	18,7
0,39	0,195	0,000540	0,002770	18,9
0,40	0,20	0,000539	0,002696	19,2
0,41	0,205	0,000538	0,002627	19,5
0,42	0,21	0,000537	0,002561	19,7
0,43	0,215	0,000537	0,002498	20,0
0,44	0,22	0,000536	0,002438	20,2
0,45	0,225	0,000535	0,002381	20,4
0,46	0,23	0,000535	0,002326	20,7
0,47	0,235	0,000534	0,002274	20,9
0,48	0,24	0,000533	0,002224	21,2
0,49	0,245	0,000533	0,002177	21,4
0,50	0,25	0,000532	0,002131	21,6
0,55	0,275	0,000530	0,001929	22,7
0,60	0,30	0,000528	0,001761	23,8
0,65	0,325	0,000526	0,001621	24,8
0,70	0,35	0,000525	0,001501	25,8
0,75	0,375	0,000524	0,001398	26,7
0,80	0,40	0,000523	0,001307	27,6
0,85	0,425	0,000522	0,001228	28,5
0,90	0,45	0,000521	0,001158	29,3
0,95	0,475	0,000520	0,001096	30,2
1,00	0,50	0,000519	0,001039	31,0

Ce tableau ne doit pas être employé dans la pratique, puisqu'il s'applique aux tuyaux neufs, ou du moins il ne peut l'être qu'avec les restrictions suivantes :

1° Lorsqu'on cherche la pente correspondant à une vitesse déterminée, on doit doubler cette pente dans la pratique, ou si la pente est donnée, il importe de la diviser par 2 et de ne compter que sur la vitesse correspondant au quotient de cette division. Cela revient à doubler la valeur du coefficient b_1; en effet, la résistance d'un tuyau recouvert d'un dépôt est double de celle que présente un tuyau neuf en fonte de même diamètre. Il va sans dire que, lorsque le dépôt est formé, la nature des parois perd à peu près son influence, de sorte que, quelle que soit la matière des tuyaux, on peut adopter pour la valeur de leur coefficient de résistance b_1 des nombres égaux au double de ceux qui sont inscrits au tableau précédent.

2° Indépendamment du retard provenant des aspérités de la paroi, il existe une autre cause qui affaiblit le volume de l'écoulement : c'est l'épaisseur de la couche déposée, qui réduit le diamètre de la section libre. Pour y remédier, il importe, suivant la nature des eaux à distribuer, d'augmenter les diamètres trouvés d'une certaine quantité d'autant plus nécessaire à ajouter que ces diamètres sont plus faibles.

La formule $rj = b_1 u^2$ ne s'applique qu'à des vitesses supérieures à $0^m,10$ par seconde, et le coefficient b_1 est variable avec le rayon r du tuyau, de sorte qu'on peut exprimer ce coefficient par la formule

$$b_1 = \alpha + \frac{\beta}{r}$$

Pour le fer étiré et la fonte lisse, les deux coefficients du second membre ont les valeurs

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0{,}000\ 507 \\ \beta = 0{,}000\ 0065 \end{array} \right.$$

Ces valeurs doivent être doublées quand la surface métallique a été recouverte d'un dépôt après quelque temps d'usage.

Enfin, pour réunir tous les cas, même ceux des faibles vitesses, dans une formule unique, Darcy a donné l'expression générale

$$rj = \left(\alpha + \frac{\alpha_1}{r^2}\right) u + \left(\beta + \frac{\beta_1}{r}\right) u^2$$

et dans le cas des parois métalliques neuves et lisses, les quatre coefficients prennent les valeurs suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0{,}000\ 034 \\ \alpha_1 = 0{,}000\ 000\ 007\ 52 \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{l} \beta = 0{,}000\ 1286 \\ \beta_1 = 0{,}000\ 0129 \end{array} \right.$$

Nous ne donnons ces nombres qu'à cause de l'intérêt théorique qu'ils peuvent offrir ; on n'aura guère l'occasion de s'en servir dans la pratique.

RELATION ENTRE LE RAYON r DE LA CONDUITE, LA CHARGE j PAR MÈTRE COURANT, LE DÉBIT q ET LA VITESSE MOYENNE u

Les problèmes relatifs au mouvement de l'eau dans les tuyaux portent sur quatre variables :

Le rayon r de la conduite, exprimé en mètres.
La charge j par mètre courant, exprimée en mètres.
Le débit q à la seconde, exprimé en mètres cubes,
La vitesse moyenne u exprimée en mètres.

Nous avons entre ces quatre quantités une première relation :

(3) $$r.j = b_1 u^2$$

et nous savons en outre que le débit est le produit de la section par la vitesse moyenne, ce qui nous donne une seconde relation :

(4) $$\pi . r^2 . u = q$$

Ainsi, les quatre quantités variables sont liées par deux relations, de sorte que, deux de ces quantités étant données, on pourra déterminer les deux autres, ce qui donne lieu à autant de problèmes différents qu'il y a de combinaisons de quatre quantités deux à deux.

Nous savons que ce nombre de combinaisons est six. Donc, il y a six problèmes à résoudre, que l'on peut résumer au tableau synoptique ci-après :

	DONNÉES.	INCONNUES.
1er *Problème*	$r\ j$	$q.u$
2e —	$r.q$	$j.u$
3e —	$r.u$	$j.q$
4e —	$j.q$	$r.u$
5e —	$j.u$	$r.q$
6e —	$q.u$	$r.j$

Voici les énoncés de ces six problèmes :

1° Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que la charge par mètre courant, déterminer la vitesse et la dépense;

2° Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que le débit qu'elle doit fournir, calculer la vitesse et la charge par mètre courant ;

3° Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que la vitesse moyenne du liquide qui la parcourt, calculer le débit et la charge par mètre courant ;

4° Connaissant la charge disponible par mètre courant et le débit qu'on veut obtenir, calculer le rayon que devra avoir cette conduite et la vitesse de l'eau qui devra la parcourir ;

5° Connaissant la charge disponible et la vitesse moyenne, déterminer le rayon et le débit ;

6° Connaissant le débit et la vitesse moyenne qu'on veut obtenir, déterminer le rayon et la charge par mètre courant.

1er Problème. *Connaissant le rayon d'une conduite ainsi que la charge par mètre courant, déterminer la vitesse et la dépense.*

Les tables de Darcy permettent de déterminer le coefficient b_1 puisque l'on connaît le rayon de la conduite ; il n'y a donc d'inconnue dans la formule (3) que la vitesse moyenne u qu'il est facile d'en déduire.

Connaissant la vitesse moyenne, le débit s'obtient immédiatement par l'équation (4).

Généralement, on n'a pas besoin de faire tous les calculs et on prend dans les tables les résultats cherchés. On trouvera ces tables avec des exemples à la fin du présent traité.

2e Problème. *Connaissant le rayon d'une conduite et le débit qu'elle doit fournir, on demande quelles doivent être la vitesse et la charge par mètre courant.*

L'équation (3) renferme les deux inconnues j et u; il faut en éliminer une, ce qu'on fait en tirant de l'équation (4) la valeur de u qu'on reporte dans l'équation (3). Il en résulte :

$$(5) \qquad j = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5}$$

On connaît le coefficient b_1 puisqu'il dépend seulement du rayon r et qu'il est fourni par les tables ; donc, on peut calculer la charge j par mètre courant. L'usage des tables rendra ce calcul assez simple.

Quant à la vitesse moyenne u, elle est fournie par l'équation (4) dont elle est la seule inconnue.

Du reste la connaissance de la vitesse moyenne est généralement peu intéressrnte lorsqu'on a déjà le débit ; le débit est l'inconnue principale.

L'équation (5) nous apprend que, le rayon r restant constant, la charge augmente comme le carré du débit, de sorte que pour obtenir un débit double il faut quadrupler la charge. C'est donc plutôt à une augmentation du diamètre de la conduite qu'à une augmentation de la charge qu'il faut demander un accroissement de débit. Cela se conçoit si on remarque que la résistance au mouvement croît comme le carré de la vitesse, tandis que la force motrice due a la pesanteur varie proportionnellement à la charge.

3e Problème. *Connaissant le rayon d'une conduite et la vitesse d'écoulement, déterminer le débit et la charge par mètre courant.*

Les équations (3) et (4) renferment chacune une seule inconnue : la première, la charge j et la seconde le débit q. Le problème est donc immédiatement résolu :

$$j = \frac{b_1 u^2}{r} \quad \text{ou} \quad \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5}$$

et

$$q = \pi r^2 u.$$

Les tables donnent immédiatement la solution du problème qui, du reste, est sans intérêt pratique.

4e Problème. *Connaissant la charge disponible et le débit à obtenir, on demande le rayon et la vitesse de la conduite.*

Éliminant u entre les équations (3) et (4) on trouve :

$$(6) \qquad r^5 = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 . j}$$

et cette équation donnerait la valeur de r au moyen des logarithmes si l'on avait la valeur numérique de b_1. Mais, d'après les formules de Darcy, b_1 dépend de r, de sorte qu'en remplaçant b_1 par sa valeur on aurait une équation complète du 5ᵉ degré en r, difficile à résoudre.

Voici comment on peut opérer pour arriver rapidement au résultat : la valeur moyenne de b_1 pour les tuyaux neufs est de 0,000625 ou $(0,025)^2$; dans une première approximation, on donnera à b_1 cette valeur moyenne et on en déduira la valeur correspondante de r. Celle-ci connue, les tables de Darcy fourniront une valeur approchée de b_1 qui donnera à son tour une valeur plus approchée du rayon. Généralement, il sera inutile d'aller plus loin et l'approximation sera suffisante.

On arrive encore à la solution du problème au moyen des tables à double entrée, analogues à celle qu'avait dressée M. Mary en prenant pour bases les expériences de de Prony.

5ᵉ Problème. *Connaissant la charge disponible et la vitesse moyenne, déterminer le rayon et le débit de la conduite.*

Les équations (3) et (4) ne renferment chacune qu'une inconnue dont elles donnent immédiatement la valeur. Cependant, comme b_1 dépend de r, il faut, pour déterminer le rayon, procéder par approximations successives, comme nous l'avons fait plus haut.

6ᵉ Problème. *Connaissant le débit et la vitesse moyenne qu'on veut obtenir, on demande la charge et le rayon de la conduite.*

Les équations (3) et (4) résolues par rapport à j conduisent à :

$$(7) \qquad j^2 = \frac{\pi b_1^2 u^5}{q}$$

Quant au rayon (r) il résulte de l'équation :

$$r^2 = \frac{q}{\pi u}$$

c'est lui qu'on déterminera tout d'abord. La connaissance du rayon entraîne celle du coefficient b_1 ; il ne reste plus à déterminer que la charge qui s'obtient par la formule (7).

Remarque. Des six problèmes que nous venons de résoudre, il n'y en a que deux d'importants et qui se rencontrent dans la pratique ; c'est le premier et le quatrième.

La solution numérique en est facile, grâce aux tables que nous donnons à la fin de ce traité.

En ce qui touche les quatre autres problèmes, ils ne se présentent pour ainsi dire jamais ; on en calculera directement les résultats par les formules précédentes, ou bien on aura recours aux tables lorsque l'usage en sera possible.

Résolution du premier et du quatrième problèmes dans le cas d'une conduite cylindrique faisant communiquer deux réservoirs. — Soit deux réservoirs, dont les niveaux invariables sont à une hauteur h l'un de l'autre ; on les réunit par une conduite ab, l'écoulement s'établit du réservoir le plus élevé vers le plus bas, et on se propose de déterminer :

1° le rayon de la conduite qui débitera un volume donné ;

2° Ou bien le volume que débitera une conduite de rayon donné. Ces deux

problèmes correspondent au premier et au quatrième des problèmes généraux que nous venons de passer en revue.

Nous admettons que les deux réservoirs débouchent librement dans l'atmo-

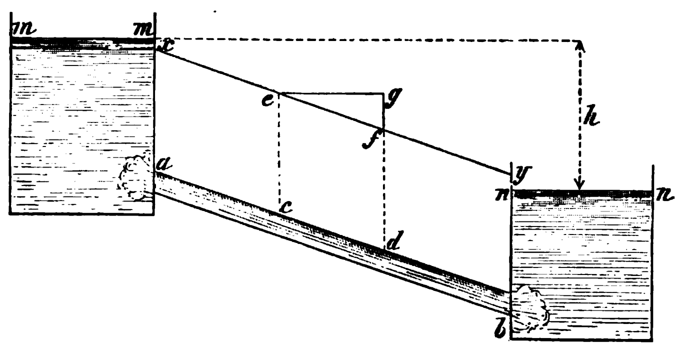


Fig. 1.

sphère; si par hasard il n'en était pas ainsi, que la pression fût égale à p sur le réservoir m et à p' sur le réservoir n, il faudrait remplacer la différence h des niveaux piézométriques par

$$\left(h+\frac{p-p'}{\pi}\right)$$

expression dans laquelle π représente la densité du liquide.

La différence des niveaux piézométriques en m et n est donc égale à h ; comme les réservoirs sont d'une section très-grande comparée à celle de la conduite, il n'y a point de vitesse sensible dans les parties hautes de ces réservoirs, et l'eau part d'une vitesse nulle en m pour arriver à une vitesse nulle en n.

Tout le travail produit par la pesanteur est donc absorbé par les contractions, les frottements et les tourbillons.

Ce travail est représenté par la charge h; il faut donc que toutes les pertes de charge cumulées de m en n donnent un total égal à h.

Ces pertes de charge comprennent :

1° La perte de charge due à la contraction de la veine, à l'entrée a de la conduite: cette entrée se fait par un ajutage cylindrique dont nous avons donné la théorie à la page 44 de notre traité d'hydraulique; nous avons vu que la charge au-dessus de l'orifice a était absorbée pour $\frac{2}{3}$ par la vitesse u d'écoulement à l'extrémité de l'ajutage et pour un tiers par la contraction de la veine à l'entrée de l'ajutage. Il en résulte que la perte de charge, produite par cette contraction, est la moitié de la hauteur $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$ due à la vitesse du liquide à l'extrémité de l'ajutage. Ainsi, nous constatons à l'entrée de la conduite une perte de charge égale à $\left(\frac{1}{2}\frac{u^2}{2g}\right)$;

2° La perte de charge due au frottement du liquide sur les parois du tuyau ab dont la longueur est l; cette perte j par mètre courant est égale à $\left(\frac{b_1u^2}{r}\right)$ et pour la longueur l, elle devient: $\left(\frac{lb_1u^2}{r}\right)$;

3° La perte de charge due à la destruction de la vitesse u au-delà de l'extrémité b de la conduite. Cette vitesse s'évanouit en remous et tourbillons ; la perte de charge est donc totale et représentée par $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$.

De la sorte, nous arrivons à l'équation :

$$h=\frac{3}{2}\frac{u^2}{2g}+\frac{lb_1u^2}{r},$$

qui peut s'écrire :

$$\frac{rh}{l}=b_1u^2\left(1+\frac{3}{2}\frac{r}{b_1l.2g}\right)$$

1° Si c'est le débit qui est donné et qu'on veuille calculer le rayon r, on remplace u par $\left(\frac{q}{\pi r^2}\right)$ et on a l'équation :

$$(a)\qquad r^5=\frac{l}{h}.b_1\frac{q^2}{\pi^2}\left(1+\frac{3}{2}\frac{r}{2g.b_1l}\right)$$

Il faudrait d'abord déterminer b_1, qui dépend de r ; on opère comme nous l'avons déjà fait, on remplace b_1 par sa valeur moyenne 0,000625 (tuyaux neufs), et, dans une première application, on néglige le second terme de la parenthèse du second membre, ce second terme est toujours très-petit relativement à l'unité. On détermine ainsi une valeur approchée de r ; elle permet de trouver dans les tables la valeur approximative de b_1 ; on recommence alors les calculs avec cette nouvelle valeur de b_1 et, en substituant à r dans la parenthèse du second membre sa valeur approchée, on arrive à trouver pour le rayon un nombre dont on peut se contenter. Il serait, du reste, facile de pousser l'approximation plus loin.

Exemple numérique. *Deux réservoirs, présentant une différence de niveau de* 10 *mètres, sont réunis par une conduite d'un kilomètre de long. Quel devra être le rayon de cette conduite pour qu'elle débite* 0^{mc},5 *à la seconde?*

$$l=1000 \quad h=10 \quad q=0,5$$

Lorsque la conduite aura servi quelque temps, la résistance de ses parois doublera, à cause des dépôts qui les recouvriront, et le coefficient moyen b_1 deviendra égal à deux fois

0,000625 soit à 0,00125

Première approximation :

$$r^5=100.0,00125.\frac{\overline{0,5}^2}{\overline{3,14}^2} \qquad r=0,32$$

Deuxième approximation :

La table de Darcy donne pour $r=0,32$... $b_1=0,000526$ pour les tuyaux neufs, et, par suite, 0,00105 pour les tuyaux depuis longtemps en service.

$$r^5=100.0,00105.\frac{\overline{0,5}^2}{\overline{3,14}^2}(1,023) \qquad r=0^m,31$$

Il est inutile de pousser plus loin l'approximation.

2° Si l'on donne le diamètre de la conduite et qu'on demande le débit, il n'y aura qu'à résoudre l'équation (*a*) par rapport à q : elle donne :

$$(b) \qquad q^2 = \frac{\pi^2 h . r^5}{l b_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{r}{2g . b_1 . l}}$$

Exemple numérique. *Quel sera le débit d'une conduite de* 0^m,31 *de rayon, de* 1000 *mètres de longueur, réunissant deux réservoirs dont les niveaux sont à* 40 *mètres de hauteur l'un par rapport à l'autre ?*

$$r = 0^m,31 \qquad h = 40 \qquad l = 1000$$

D'après les tables de Darcy, $b_1 = 0,000528$ pour les tuyaux neufs, ce qui fait, pour des tuyaux en service :

$$b_1 = 0,00105$$

Portant ces données dans l'équation (*b*), il vient :

$$q^2 = 1,004 \quad \text{et} \quad q = 1.$$

Le débit est donc d'un mètre cube ; en effet, nous avons quadruplé la charge dont nous disposions dans l'exemple précédent, par suite le débit, qui varie proportionnellement à la racine carrée de la charge, a dû doubler.

Construction de la ligne de charge. — Si nous nous reportons à la figure 1, il est facile de suivre la ligne de charge depuis le réservoir m jusqu'au réservoir n, c'est-à-dire de reconnaître quelle est en chaque point la hauteur de la colonne piézométrique.

Nous faisons abstraction de la pression atmosphérique qui s'exerce également des deux côtés ; au moment où le liquide pénètre dans la conduite en a, la charge est marquée par la profondeur de l'orifice a au-dessous du niveau m du réservoir, le niveau piézométrique est en m.

Par suite de la contraction de la veine liquide, il y a une perte de charge égale à $\left(\frac{1}{2} \frac{u^2}{2g}\right)$; si nous prenons une hauteur mx égale à cette quantité, la ligne de charge tombera rapidement de m en x.

De même, à l'extrémité de la conduite, il reste la charge qui correspond à la vitesse u ; cette charge, représentée par la hauteur $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$, disparaît en tourbillons ; si nous prenons la hauteur ny égale à $\frac{u^2}{2g}$, et que nous traçions la droite xy, cette droite représentera la ligne de charge sur tout le parcours de la conduite, entre les deux réservoirs.

La pression en un point c de la conduite est donc représentée par la colonne d'eau ce ; la pression au point d est représentée par la colonne df. La verticale fg représente la chute de c en d, c'est-à-dire la charge absorbée pour entretenir le mouvement uniforme du liquide sur la portion cd du tuyau.

Si l'on adapte aux points c et d de la conduite deux tuyaux flexibles assez longs pour qu'on en puisse accoler les parties supérieures sur une planche verti-

cale, l'eau s'élèvera dans ces tuyaux flexibles aux niveaux représentés par les points c et f; on verra immédiatement la différence de ces deux niveaux, et, si la planche verticale porte une graduation, on connaîtra immédiatement la hauteur fg, c'est-à-dire la perte de charge correspondant à la longueur cd de la conduite.

L'appareil que nous venons de décrire porte le nom de piézomètre différentiel; nous verrons tout à l'heure l'usage qu'en a fait Darcy dans ses expériences sur l'écoulement de l'eau dans les conduites.

Généralement, on ne tient pas compte des pertes de charge produites par la contraction du liquide à l'entrée de la conduite et par la destruction de la vitesse à la sortie, pertes de charge que nous avons représentées par les verticales mx et ny; en effet, elles sont insensibles par rapport aux pertes de charge dues aux frottements dès que la longueur de la conduite est notable.

Cherchons-en la valeur pour le premier exemple numérique donné plus haut :

La vitesse u est le quotient du débit $q=0{,}5$ par la section $\pi.\overline{0{,}31}^2=0{,}302$; elle est donc égale à $\left(\frac{5}{3}\right)$ et sa hauteur représentative est de $0^m{,}14$.

Ainsi, la hauteur mx serait égale à $0^m{,}07$ et la hauteur ny à $0^m{,}14$. Dans nombre de cas de la pratique, ces hauteurs seront encore moindres.

Elles sont donc négligeables en présence de la perte de charge totale, et on peut supposer celle-ci répartie uniformément sur toute la longueur de la conduite, ce qui revient à remplacer la ligne de charge réelle $mxyn$ par la droite mn.

DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES DE DARCY

Les raisonnements et les calculs du paragraphe précédent vont nous permettre de comprendre facilement la disposition adoptée par Darcy pour ses expériences.

Elles ont été exécutées dans les dépendances des réservoirs de Chaillot, alimentés par de l'eau de Seine qu'y envoient les puissantes machines de Cornouailles décrites dans notre *Traité des machines à vapeur*.

Grâce à ces réservoirs élevés on disposait à la fois de grands volumes d'eau et de fortes charges; les appareils d'expérimentation proprement dits (fig. 2), se trouvaient dans les parties basses, près des berges de la Seine.

L'eau des réservoirs arrivait dans un cylindre couché a par une conduite de gros diamètre, dont on faisait varier à la fois la charge et le débit au moyen d'un robinet étranglant plus ou moins le passage.

Le cylindre a jouait le rôle de réservoir d'alimentation pour la conduite à expérimenter, il était rempli d'un liquide animé d'une faible vitesse et possédant une charge plus ou moins forte, suivant la hauteur du réservoir supérieur avec lequel il communiquait et suivant l'étranglement produit par le robinet. Le cylindre a était destiné à amortir la vitesse de l'eau avant son entrée dans les conduites; à l'intérieur était placé un diaphragme formé d'une plaque de tôle percée de trous; à l'avant, il se terminait par une plaque verticale en fonte, dans laquelle on pratiquait des orifices circulaires destinés à recevoir l'origine

des conduites à expérimenter. A sa partie la plus haute, le cylindre portait un robinet pour l'évacuation de l'air.

Il portait en outre un robinet 5, sur lequel se vissait un tube flexible ou piézomètre ; le niveau auquel l'eau s'élevait dans ce tube mesurait la pression.

Un peu après l'origine *m* de la conduite, on trouvait un second robinet à piézomètre 4 ; la différence des piézomètres 5 et 4 donnait la perte de charge due à la contraction de la veine à son entrée dans la conduite.

A environ 5 mètres plus loin, on trouvait le piézomètre 3, servant à mesurer la charge au point où le mouvement commençait réellement à devenir uniforme. A 50 mètres plus loin, se trouvaient le robinet et le piézomètre n° 2.

Enfin à 50 mètres au-delà se trouvaient le robinet et le piézomètre n° 1. La différence de niveau entre les piézomètres 3 et 1 donnait la perte de charge produite par les frottements dans la conduite sur une longueur de 100 mètres.

Au-delà du piézomètre 1, la conduite se prolongeait pendant quelques mètres et portait un robinet vanne *v* ; elle débouchait dans une cuve *b*, d'où l'eau s'épanchait par une échancrure ou déversoir dans des bassins de jauge *d* ; le niveau de l'eau dans la cuve *b* était donné par un tube indicateur en verre accolé à cette cuve.

Les conduites étaient posées sur des dés en pierre bien solides, avec une légère pente dirigée en sens inverse du mouvement, afin de permettre une facile émission de l'air lors de la mise en charge.

Fig. 2.

Les tuyaux piézométriques étaient réunis le long d'une planche verticale *c*, placée à peu près au milieu de la longueur de la conduite.

Tant que la charge restait inférieure à 6 mètres, les piézomètres étaient à colonnes d'eau ; pour des charges supérieures, on se servait de véritables manomètres à mercure débouchant à l'air libre.

A la planche verticale était jointe une échelle en fer permettant à un observateur de suivre facilement et constamment les variations des niveaux piézométriques.

Les expériences ont toujours été faites sur 100 mètres de longueur, sauf pour une conduite en verre et pour les conduites en plomb.

La perte de charge dans la conduite, sur une longueur de 100 mètres, était donnée par la différence des hauteurs des piézomètres 1 et 3. A première vue, dit M. Darcy, le piézomètre 2 du milieu ne semblerait pas nécessaire, mais il a rendu de grands services pendant les expériences en accusant des perturbations qui auraient vicié les expériences et dont on ne se serait pas aperçu si on n'avait pas eu ce piézomètre supplémentaire. En effet, pour être certain que tout fonctionnait convenablement, il fallait que les différences entre le premier et le deuxième ainsi qu'entre le deuxième et le troisième manomètres fussent à peu près égales. Je dis à peu près, parce que quelque variation dans le diamètre moyen de la conduite, en amont ou en aval, pouvait occasionner une légère différence, mais dans ce cas, la différence devait toujours se produire dans le même sens pour toutes les charges. Lorsque ces conditions n'étaient pas remplies, on était obligé, ou de réparer les fuites, ou de faire différentes manœuvres pour purger d'air la conduite.

Pour les conduites en plomb, les manomètres furent placés à 25 mètres l'un de l'autre ; on opérait donc sur une longueur de 50 mètres seulement ; la seule conduite en verre mise en expérience avait 44 mètres de long.

Les joints des conduites avaient été faits avec le plus grand soin, de manière à ne présenter aucune saillie à l'intérieur : toute fuite et tout suintement étaient immédiatement réparés avant l'expérience.

Il était très-difficile, au commencement d'une série d'expériences, d'arriver à chasser l'air des tubes des piézomètres : on était forcé de laisser couler l'eau pendant longtemps à pleine charge et on reconnaissait que toute irrégularité avait disparu lorsque les différences étaient égales entre les piézomètres 1 et 2, 2 et 3.

Le diamètre moyen de la conduite mise en expérience se déduisait du volume d'eau qu'il fallait pour la remplir sur sa longueur entière.

Les expériences ont porté sur 22 tuyaux différents, savoir :

3	tuyaux	en fer étiré	d'un diamètre compris entre	12 et 30	millimètres.
3	—	plomb	—	14 et 41	—
4	—	tôle et bitume	—	26 et 285	—
1	—	verre	—	49	
11	—	fonte	—	79 et 500	

Les résultats des expériences ont été résumées par M. Darcy dans une série de tableaux qui lui ont permis d'établir les formules et les coefficients pratiques que nous avons précédemment reproduits.

Nous mentionnerons pour mémoire ses expériences, très-intéressantes au point de vue théorique, sur la répartition des vitesses dans la section d'un tuyau : il déterminait les vitesses au moyen d'un tube de Pitot très-délié, introduit dans la conduite à une profondeur variable. Les formules de M. Maurice Lévy sont d'accord avec les résultats expérimentaux de Darcy.

A la fin de son mémoire intitulé : *Recherches expérimentales sur le mouvement de l'eau dans les tuyaux*, Darcy a placé des tables pratiques destinées à faciliter la solution des problèmes de distribution ; nous reprocherons à ces tables de

s'appliquer uniquement à des tuyaux neufs ; comme on ne doit en pratique compter que sur le rendement des tuyaux ayant un certain temps de service, il faut corriger les résultats des tables ainsi que nous l'avons dit.

Nous avons remanié ces tables de manière à les rendre uniquement applicables aux tuyaux recouverts de dépôts et, par là, nous les avons mises sous une forme réellement pratique.

Pertes de charge produites par les changements de diamètre, les branchements et les coudes. 1° Changement de diamètre. — Lorsqu'un courant liquide passe d'un tuyau *a* dans un tuyau *b* de diamètre différent, il y a production de chocs et de tourbillons qui absorbent une certaine quantité de force vive représentée par une perte de charge. Le liquide renfermé dans les angles du plus grand tuyau *b* se renouvelle lentement et est agité de mouvements circulaires.

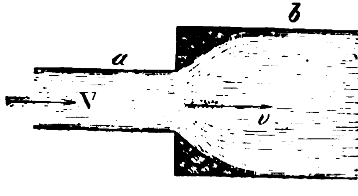


Fig. 3.

Nous avons à la page 42 de l'hydraulique examiné ce phénomène et évalué la perte de charge, qui est égale à la hauteur représentative d'une vitesse égale elle-même à la différence des vitesses d'écoulement dans les deux tuyaux.

Autrement dit, si V est la vitesse moyenne d'écoulement dans le tuyau *a* et *v* la vitesse moyenne dans le tuyau *b*, la perte de charge est égale à

$$\frac{(V-v)^2}{2g}$$

2° **Branchements.** — Soit un tuyau principal *ab*, figure 4, sur lequel se greffe un tuyau secondaire *c*, on a ce qu'on appelle un branchement.

Les eaux venant de *a* se répartissent dans les deux directions *b* et *c* et la vitesse

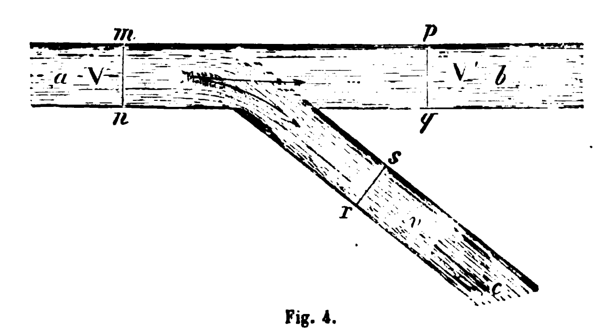


Fig. 4.

V' dans le tuyau principal à l'aval du branchement est moindre que la vitesse V à l'amont.

D'autre part, les eaux s'infléchissent pour passer de *a* en *c*, elles se contractent à l'entrée du tuyau *c* ; il y a donc une perte de force vive et par suite une perte de charge entre les sections *mn* et *rs*. Il se forme un remous, notamment dans l'angle amont de la conduite,

La perte de charge est difficile à apprécier, elle dépend évidemment de la direction du branchement par rapport à la conduite principale.

Presque toujours les branchements sont normaux ; les expériences de Belanger et Genieys semblent indiquer que, dans ce cas, la perte de charge, lorsqu'on

passe de la section mn dans la section rs, est égale à deux fois la hauteur représentative de la vitesse d'écoulement v dans cette dernière section rs.

Ainsi la perte de charge serait de $\left(\frac{2v^2}{2g}\right)$,

Les déviations et les remous paraissent avoir leur action principale à l'entrée du branchement c, cependant ils doivent se faire sentir aussi sur la conduite maîtresse et les chocs contre l'angle aigu du branchement ne sont pas sans absorber une certaine portion de force vive.

Dans la section d'aval pq de la conduite maîtresse, la vitesse V′ est moindre que la vitesse V dans la section d'amont mn, puisqu'il passe moins de liquide dans la première que dans la seconde. S'il n'y avait point perte de charge de mn en pq, la diminution de vitesse se traduirait par une augmentation équivalente du niveau pézométrique, c'est-à-dire par un relèvement de la ligne de charge.

Dans la pratique, on admet que ce relèvement est absorbé par la perte de charge et on conserve le même niveau piézométrique à l'aval qu'à l'amont du branchement.

Il serait facile de déterminer expérimentalement les pertes de charge qui se produisent au passage des branchements; mais les expériences n'ont pas été entreprises parce qu'elles ne présentent pas un grand intérêt pratique; généralement, la longueur des conduites est assez considérable pour que les frottements sur les parois possèdent une influence prépondérante et pour qu'on puisse négliger les pertes de charge secondaires.

Néanmoins, il est possible d'en tenir compte en les évaluant comme nous venons de le faire tout à l'heure.

3° Coudes. — Les coudes déterminent une inflexion de la masse liquide qui parcourt le tuyau et entraînent nécessairement une perte de force vive en même temps que la production d'une force centrifuge.

Force centrifuge. — Cette force centrifuge a pour expression $\left(\frac{m.\ v^2}{R}\right)$ m étant la masse du liquide en mouvement, v sa vitesse et R le rayon moyen du coude.

Considérons une conduite de 0^{m},50 de diamètre parcourue par de l'eau animée d'une vitesse de 2^{m} à la seconde; cette conduite est courbée suivant un arc de 2^{m} de rayon, et on demande la valeur de la force centrifuge déployée sur un mètre courant du coude.

La masse est le quotient du poids par l'accélération g de la pesanteur, par suite :

$$m = \frac{\pi r^2.1000}{g} = \frac{3.14 \times 1000}{16.9,8} = 20$$

$$v^2 = 4 \quad R = 2 \quad m\frac{v^2}{R} = 40 \text{ kilog.}$$

Ainsi, la conduite exercera une poussée centrifuge de 40 kilogrammes par mètre courant du coude, et on devra s'opposer à cette poussée qui déformerait la conduite; à cet effet, la conduite maîtresse étant posée en galerie, on la relie par des supports en fonte au massif de la maçonnerie.

Perte de charge. — M. Mary a trouvé que les pertes de charge par coude ne dépassaient pas 0^{m},002 pour des vitesses de 0^{m},58 à 0^{m},60; pour des vitesses de 1 mètre, la perte de charge produite par un coude correspondrait à un accroissement de la longueur de la conduite égal à quatre fois son diamètre.

Quelques expériences de Dupuit ont montré aussi que les pertes de charge dues

aux coudes et étranglements correspondaient à l'accroissement de résistance qui résulterait d'un léger allongement du tuyau.

La découverte d'une formule qui donnerait exactement l'influence des angles dans les conduites ne saurait, dit Dupuit, avoir beaucoup d'utilité pratique.

Il est inutile de faire des calculs spéciaux au sujet des résistances autres que celle qui résulte du frottement à la paroi. Les expériences montrent en outre que l'avantage d'avoir une conduite plus ou moins rectiligne est de peu d'importance et qu'il ne faut jamais faire de grands sacrifices pour l'obtenir. Il va sans dire qu'il ne faut pas multiplier sans nécessité les coudes et les sinuosités; mais, quand ils sont motivés par l'état des lieux et qu'on ne saurait les faire disparaître qu'avec de grandes dépenses, il faut s'y résigner. La moindre augmentation du diamètre de la conduite dans cette partie ferait plus que compenser la perte de charge due à ces circonstances.

En somme, pour tenir compte de l'influence des étranglements, des branchements et des coudes, il suffit d'ajouter à la longueur réelle de la conduite une certaine quantité proportionnelle à son diamètre, et l'on pourra profiter de cette circonstance pour arrondir le chiffre de cette dimension, ce qui abrégera les calculs.

TUYAUX A DIAMÈTRE OU A DÉBIT VARIABLE

Lorsqu'il s'agit de tuyaux à diamètre ou à débit variable, le mouvement uniforme n'existe plus, et les circonstances du mouvement, bien que constantes dans une section donnée, varient d'une section à l'autre.

Cherchons à établir dans ce cas l'équation fondamentale du mouvement.

Equation fondamentale du mouvement varié. — Pour préciser la position des sections du tuyau, désignons par s la distance où elles se trouvent de l'origine, distance comptée sur l'axe du tuyau; deux sections voisines sont situées à la distance ds l'une de l'autre et la différence de leurs charges est mesurée par la différence dy de leurs niveaux piézométriques.

dy mesure donc la perte de charge lorsque le liquide passe de la première à la seconde section.

Cette perte de charge est la somme de la perte de charge due à la variation des vitesses et de la perte de charge absorbée par les frottements.

1° Pour avoir la perte de charge due à la variation des vitesses, il faudrait considérer les vitesses propres de chaque filet et prendre les différences des hauteurs dues à ces vitesses. En l'état actuel de la science, il est impossible d'opérer ainsi parce qu'on ne connaît pas d'une manière suffisamment exacte la loi de la répartition des vitesses dans une section. Pour simplifier, on admet que tous les filets liquides ont la même vitesse u égale à la vitesse moyenne, c'est-à-dire au quotient du débit par la section. La différence des charges dues aux vitesses $(u + du)$ et u est égale à

$$\frac{(u+du)^2 - u^2}{2g} \quad \text{c'est-à-dire à} \quad \frac{udu}{g};$$

c'est la valeur de la perte de charge produite par la variation des vitesses.

2° Quant à la perte de charge due aux frottements, nous l'avons évaluée en bloc dans le cas du mouvement uniforme par l'équation :

$$j.r = b_1 u^2;$$

j est la perte de charge par mètre courant ; les deux sections voisines considérées se trouvant à la distance ds, il en résulte une perte de charge $j.\ ds$.

Nous faisons, il est vrai, une hypothèse non justifiée en admettant que la valeur des frottements est la même dans le mouvement varié que dans le mouvement uniforme ; il est probable qu'il n'en est pas ainsi. Cependant, si les variations de diamètre et de débit ne sont pas trop brusques, l'hypothèse semble naturelle, et comme on n'a rien de mieux pour la remplacer, on la conserve.

Égalant d'une part la chute des niveaux piézométriques, et d'autre part la somme des pertes de charge, nous trouvons pour l'équation fondamentale du mouvement varié dans les tuyaux la formule :

(1) $$dy = \frac{u.du}{g} + \frac{b_1 u^2}{r}.ds$$

qu'il faut toujours combiner avec l'équation du débit :

(2) $$q = \pi.r^2.u$$

1° Conduites simples à diamètre variable et à débit constant.

Considérons une conduite de longueur l, à rayon r variable et à débit q constant. Soit y la perte de charge, lorsqu'on passe de la section initiale où la vitesse est u_0 à la section finale où la vitesse est u.

Intégrons l'équation (1) entre ($s = o$) et ($s = l$), il vient :

(3) $$y = \frac{u^2 - u_0^2}{2g} + \int_o^l \frac{b_1 u^2}{r}.ds$$

le premier terme du second membre est toujours très-faible par rapport au second terme et on n'en tient pas compte.

D'autre part, nous savons que le coefficient b_1 varie avec le rayon r, mais que cependant ses variations sont peu considérables pour les tuyaux d'un diamètre supérieur à $0^m,06$; il est donc permis, dans une formule approximative comme celle qui nous occupe, de substituer au coefficient b_1 sa valeur moyenne.

Cette valeur moyenne est 0,000625 pour les tuyaux neufs
et 0,00125 pour les tuyaux ayant quelque service
ce dernier nombre est égal à la fraction $\frac{1}{800}$

Ainsi l'équation (4) prend la forme plus simple

$$y = \frac{1}{800} \int_o^l \left(\frac{u^2}{r}.ds\right)$$

remplaçant u par sa valeur $\left(\frac{q}{\pi r^2}\right)$, elle devient :

(4) $$y = \frac{q^2}{800 \pi^2} \int_o^l \frac{ds}{r^5}.$$

Cette équation (4) nous donne tout d'abord une conséquence importante : la quantité $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ à intégrer dépend uniquement des dimensions du tuyau, elle n'est liée ni au débit q ni à la charge (y) ; donc, pour une charge donnée y, le débit restera constant, quelque soit le tuyau, pourvu que l'intégrale de $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ reste elle-même constante.

Tuyaux équivalents. — Deux tuyaux sont équivalents lorsqu'ils donnent le même débit sous la même charge.

D'après la remarque précédente, cela arrivera lorsque l'intégale de $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ sera constante. Or, dans le cas d'un diamètre uniforme, cette intégrale devient $\left(\frac{l'}{r'^5}\right)$; donc, le tuyau cylindrique équivalent d'un tuyau à diamètre variable s'obtient par l'équation

$$\frac{l'}{r'^5}=\int_0^l \frac{ds}{r^5}$$

qui déterminera l' ou r', suivant qu'on se donnera l'une ou l'autre de ces deux variables.

Si un tuyau a un rayon qui varie par saccades et non d'une manière continue et qu'il se compose de longueurs successives.

$$l_0 \quad l_1 \quad l_2 \quad l_3 \ldots\ldots$$

ayant pour rayons

$$r_0 \quad r_1 \quad r_2 \quad r_3 \ldots\ldots$$

le tuyau cylindrique équivalent résultera de l'équation :

$$\frac{l'}{r'^5}=\frac{l_0}{r_0^5}+\frac{l_1}{r_1^5}+\frac{l_2}{r_2^5}\ldots\ldots=\Sigma\left(\frac{l}{r^5}\right)$$

L'équation (4), résolue par rapport au débit, prend la forme :

$$q^2=\frac{800.\pi^2.y}{\int\left(\frac{ds}{r^5}\right)} \tag{5}$$

Conduite à rayon variable remplacée par une conduite équivalente de même longueur à rayon constant. — Soit une conduite dont la longueur L se subdivise en longueurs élémentaires l, l', l''..... ayant pour rayons respectifs r, r', r''...., on demande le rayon R de la conduite équivalente de même longueur L.

Ce rayon résultera de l'équation :

$$\frac{L}{L^5}=\frac{l}{r^5}+\frac{l'}{r'^5}+\frac{l''}{r''^5}+\ldots\ldots$$

Il est facile de la calculer grâce aux tables qu'on trouvera à la fin de ce chapitre.

Ainsi la conduite équivalente aura même longueur que la conduite complexe, même charge et même débit. Une seule chose variera, qui du reste est peu importante, c'est la forme de la ligne de charge entre l'origine et l'extrémité de la conduite.

Remarque : De l'équation précédente résulte encore ceci :

Une conduite, formée de plusieurs tuyaux de rayons différents, porte à l'extrémité le même débit, quel que soit l'ordre dans lequel ces tuyaux se succèdent.

Il ne faut pas oublier que toutes ces conclusions s'appliquent aux cas où les pertes de charge produites par les changements de diamètres sont négligeables en présence des pertes de charge engendrées par les frottements, c'est ce qui arrive toutes les fois que les tuyaux différents ont, par rapport à leur diamètre, une longueur considérable, et c'est le cas ordinaire de la pratique.

Conduite à rayon variable remplacée par une conduite équivalente de rayon déterminé. — Étant donnée une conduite composée de tronçons l, l', l''.. ayant pour rayons r, r', r''...., trouver une conduite équivalente ayant pour rayon R.

La longueur de cette conduite s'obtiendra par l'équation :

$$\frac{L}{R^5}=\frac{l}{r^5}+\frac{l'}{r'^5}+\frac{l''}{r''^5}\cdot\cdot\cdot\cdot\cdot$$

Veut-on que le rayon R soit égal à l'un des rayons r de la conduite primitive? on trouvera pour la longueur

$$L=l+l'\frac{r^5}{r'^5}+l''\frac{r^5}{r''^5}+\cdot\quad\cdot\cdot\cdot$$

ainsi la longueur L est toujours supérieure à l.

Soit une conduite de longueur L et de rayon R, on lui trouve un débit insuffisant et, pour l'augmenter, on double le rayon sur la moitié de la longueur par exemple, voyons quelle augmentation de débit en résultera :

L'intégrale de $\left(\frac{ds}{r^5}\right)$ est dans le premier cas égale à $\left(\frac{L}{R^5}\right)$ et devient dans le second cas :

$$\frac{1}{2}\frac{L}{R^5}+\frac{1}{2}\frac{L}{(2R)^5}\quad \text{ou}\quad \frac{33}{64}\frac{L}{R^5}$$

D'après l'équation (5) le débit augmente donc dans le rapport de 1 à $\sqrt{\frac{33}{64}}$ ou dans le rapport de $\sqrt{64}$ à $\sqrt{33}$, soit 1,4 ; le débit n'aura donc augmenté que des quatre dixièmes de sa valeur primitive, et cependant on aura effectué une dépense considérable.

Au contraire, doublons le diamètre sur toute la longueur, le débit augmentera dans le rapport de $\sqrt{32}$ à 1. C'est-à-dire qu'il deviendra 5,66 fois plus grand. — On tirera donc d'une dépense double un profit 14 fois plus grand.

— « On voit par là, dit Dupuit, que, *quand une conduite se trouve étranglée par un petit diamètre sur une grande étendue, le produit de l'extrémité est pour ainsi dire déterminé par cette portion de conduite.* On peut donc, dans les calculs de débit, négliger toutes les portions de conduite ayant un diamètre relativement considérable et ne tenir compte que des portions de petit diamètre.

Avantage qu'il y a à réunir plusieurs conduites en une seule. — Supposez deux réservoirs communiquant par plusieurs conduites de rayons r, r', r''... que l'on veut remplacer par une seule conduite de rayon R. Nous admettons que toutes ces conduites ont à peu près la même longueur l.

D'après l'équation (5) le débit de chaque conduite est proportionnel à $\sqrt{\frac{r^5}{l}}$, et le débit de la conduite unique sera égal à la somme des débits des conduites primitives si :

$$\sqrt{\frac{R^5}{l}} = \sqrt{\frac{r^5}{l}} + \sqrt{\frac{r'^5}{l}} + \ldots\ldots$$

ou, ce qui revient au même, si :

$$\sqrt{R^5} = \sqrt{r^5} + \sqrt{r'^5} + \sqrt{r''^5} + \ldots\ldots$$

Il est donc facile de remplacer l'ensemble des conduites primitives par une seule conduite équivalente, et le rayon R se déterminera sans peine à l'aide de la table qui donne les cinquièmes puissances des rayons.

Cette table montre immédiatement qu'une conduite de $0^m,25$ de diamètre peut remplacer dix conduites de $0^m,10$ et deux conduites de $0^m,19$.

Ainsi, il y a un avantage énorme à ne point fractionner un débit entre plusieurs conduites, à moins d'y être forcé.

Influence du nombre des conduites sur le prix de leur établissement. — Nous empruntons ce paragraphe à Dupuit, qui s'exprime ainsi :

Pour conduire une certaine quantité d'eau à un point donné, le parti le plus économique est toujours de le faire au moyen d'un seul tuyau. En effet, c'est un résultat d'expérience qui sera expliqué plus loin, que le prix du mètre courant du tuyau mis en place est proportionnel au diamètre.

La dépense à faire pour une conduite unique de rayon r sera donc (A, l, r) à Paris, A = 200 francs environ); pour deux conduites de rayon r', donnant même débit que la première, la dépense sera ($2A, l, r'$) et l'on aura la relation :

$$\sqrt{r^5} = 2\sqrt{r'^5} \quad \text{d'où} \quad r' = \frac{r}{\sqrt[5]{4}}$$

L'expression de la dépense devient :

$$Alr\,\frac{2}{\sqrt[5]{4}} = Alr\sqrt[5]{8}$$

pour trois conduites on aurait de même une dépense de :

$$A.l.r\,\sqrt[5]{27}$$

et pour un nombre n de conduites :

$$A.l.rn^{\frac{3}{5}}$$

La dépense pour une conduite étant représentée par		......	100
Elle sera, pour deux conduites débitant le même volume		....	152
—	trois	—	193
—	quatre	—	230

La recherche des conduites équivalentes suppose l'égalité des charges. — Il ne faut pas oublier que la recherche des conduites équivalentes a son point de départ, dans l'équation (4) ou dans l'équation (5), et qu'elle suppose que la quantité y reste constante. Cette quantité y est la charge ou la différence des niveaux piézométriques entre l'origine et l'extrémité de la conduite.

Il faut donc, pour que l'on puisse appliquer à divers systèmes de conduites les calculs de l'équivalence, que pour ces divers systèmes les charges entre le point de départ et le point d'arrivée soient exactement les mêmes.

2° Conduites simples à diamètre constant et à débit variable.

Dans une distribution d'eau, il existe en général une ou plusieurs conduites principales, qui donnent l'eau, à droite et à gauche, aux conduites secondaires de toutes natures.

Chaque conduite principale, sur la longueur où elle conserve un diamètre constant, peut être considérée, comme une conduite simple, à débit variable, et nous allons chercher ce que deviennent dans ce cas les formules fondamentales.

Conduite simple à diamètre constant avec service de route uniforme. — Il y a deux parties à considérer dans une conduite : le service de route et le service d'extrémité. Le service de route consiste en l'alimentation de tous les branchements secondaires que la conduite rencontre; le service d'extrémité n'est important que si la conduite débouche dans un réservoir, sinon il rentre dans le service de route.

Considérons donc une conduite simple à diamètre constant avec service de route uniforme, c'est-à-dire que la conduite abandonne, par mètre courant, un volume constant q de liquide. Si Q est son débit total à l'origine, ce débit est égal à q,l; la vitesse va, sans cesse, s'affaiblissant de l'origine jusqu'à l'extrémité où elle s'annule; à ce moment le débit total Q a été absorbé par le service de route, et, si l'on remonte de l'extrémité à l'origine, le débit augmente proportionnellement au chemin parcouru, il est de la forme q,s et la longueur s varie de zéro à l.

La formule fondamentale du mouvement varié est :

(1) $$dy = \frac{u.du}{g} + \frac{b_1 u^2}{r}.ds$$

Les longueurs s étant comptées à partir de l'orifice extrême de la conduite, l'équation précédente doit être intégrée entre l et zéro.

En une section située à la distance s de l'orifice, la vitesse u est égale à $\left(\frac{qs}{\pi r^2}\right)$; remplaçant u par cette valeur et négligeant le premier terme du second membre de l'équation (1), terme dont l'intégrale représente la hauteur due à la vitesse, à l'origine de la conduite et qui est généralement petit par rapport aux pertes de charge dues aux frottements, l'équation (1) devient :

(2) $$dy = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5} \int_l^0 s^2.ds$$

Et la perte de la charge totale y, abstraction faite de son signe, est donnée par :

$$y = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{l^3}{3}$$

Remplaçant enfin q par $\left(\frac{Q}{l}\right)$, il vient :

$$(4) \qquad y=\frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5}\cdot\frac{l}{3}.$$

Si l'on voulait obtenir la charge en une section située à une distance x de l'orifice, il faudrait intégrer l'équation (2) entre x et o et elle deviendrait :

$$(5) \qquad y=\frac{b_1 Q^2}{\pi^2 . r^5 . l^2}\cdot\frac{x^3}{3}$$

C'est là l'équation de la ligne de charge sur toute l'amplitude de la conduite; elle est facile à construire et l'on voit que c'est une parabole du troisième degré.

« La forme de cette courbe, dit Dupuit, tient à ce que, près du réservoir, la vitesse de l'eau est très-grande et presque nulle vers l'extrémité de la conduite. On a dû remarquer une certaine analogie entre les lignes de charge et les polygones funiculaires chargés de poids, entre la parabole de charge, dans le cas de la distribution uniforme, et la parabole des chaînes des ponts suspendus. Dans ce dernier cas, on a une parabole du second degré parce la tension est proportionnelle à la première puissance du poids, tandis que, pour les tuyaux, les pertes de charge étant proportionnelles à la deuxième puissance du débit, le degré de la parabole se trouve augmenté d'une unité. Cette analogie de deux théories, qui au premier aspect n'ont rien de commun, se continue beaucoup plus loin. »

Comparaison entre un service de route uniforme et un service égal à l'extrémité. — L'équation (5) de la page 14 nous donne la perte de charge, qui se produit dans une conduite à diamètre et à débit uniformes, c'est-à-dire dans une conduite qui débite le volume entier Q à son extrémité. Nous avons alors :

$$j=\frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5}$$

et pour la longueur l :

$$jl \text{ ou } y=\frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5}.l$$

Dans le cas que nous venons d'étudier, diamètre constant, service de route uniforme et service d'extrémité nul, la perte de charge résulte de l'équation :

$$y=\frac{b_1 Q^2}{\pi^2 r^5}\cdot\frac{l}{3}$$

Ainsi, *une conduite qui débite uniformément sur toute sa longueur un volume total* Q *consomme trois fois moins de charge que si elle débitait ce même volume à son extrémité.*

On peut dire encore : *à charge égale, le débit total dans le cas du service uniforme est égal au débit total dans le cas du service d'extrémité multiplié par* $\sqrt{3}$ *ou par* 1,732 ;

A charge égale et à débit égal, le rayon de la conduite dans le cas du service

d'extrémité sera égal au rayon de la conduite, dans le cas du service uniforme de route, multiplié par $\sqrt[5]{3}$ ou environ par $\frac{5}{4}$.

Conduite simple à diamètre constant avec service mixte. — Généralement, le service uniforme de route coexiste avec un service d'extrémité.

Si l'on désigne par $\left(\frac{Q_1}{l}\right)$ le service uniforme par mètre courant et par P le service d'extrémité, le débit en une section située à la distance s de l'extrémité sera égal à :

$$P + \frac{Q_1}{l} . s$$

Introduisons ce débit dans l'équation différentielle (1), en négligeant toujours le premier terme du second membre de cette équation, terme dont l'intégrale n'a qu'une valeur insignifiante, nous trouvons :

$$dy = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \int_l^o \left(P + \frac{Q_1 s}{l}\right)^2 . ds$$

et l'intégration nous donne :

$$(6) \qquad y = \frac{b_1}{\pi^2 r^5}\left(P^2 l + \frac{P.Q_1}{l} l^2 + \frac{Q_1^2}{l^2}\frac{l^3}{3}\right) = \frac{b_1 l}{\pi^2 r^5}\left(P^2 + PQ_1 + \frac{1}{3} Q_1^2\right)$$

Et même, en intégrant entre x et o au lieu d'intégrer entre l et o, on aurait l'équation de la ligne de charge, analogue à l'équation (5) et aussi facile à construire.

Veut-on savoir quel serait, pour la même charge et la même longueur, le débit Q' à l'extrémité de la conduite qui nous occupe, tout service de route étant supprimé? Ce débit s'obtiendrait par l'équation

$$y = \frac{b_1 l}{\pi^2 r^5} Q'^2 .$$

Si on la compare à l'équation (6), on arrive à la relation

$$(6\ bis) \qquad Q'^2 = P^2 + PQ_1 + \frac{1}{3} Q_1^2 ,$$

relation qui nous permet de poser les deux inégalités ci-après :

$$Q' > P + \frac{1}{2} Q_1 \qquad Q' < P + \frac{Q_1}{\sqrt{3}}$$

or :

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

Donc Q' est compris entre

$$P + 0,50\,Q_1 \quad \text{et} \quad P + 0,57\,Q_1$$

et l'on peut dire, avec une approximation bien suffisante pour la pratique, que

$$(7) \qquad Q' = P + 0,55\,Q_1.$$

Ainsi, on peut ne pas se préoccuper du service de route et calculer la conduite comme si elle n'avait qu'un service d'extrémité, pourvu qu'on ajoute à ce service les 0,55 *du service de route* Q_1.

L'équation (7) permet encore de résoudre les problèmes suivants :

1° *Une conduite donne un débit unique* Q' *à son extrémité, on lui emprunte un service de route uniforme dont le volume total est* Q_1, *on demande ce que deviendra le débit d'extrémité.*

Le débit d'extrémité s'obtient en résolvant l'équation (7) par rapport à P

$$P = Q' - 0{,}55\,Q_1 \tag{8}$$

2° *Une conduite donne un débit unique* Q' *à son extrémité, on peut se contenter d'un débit d'extrémité égal seulement à* P, *quel sera le cube restant disponible pour un service uniforme de route?*

Le service de route disponible s'obtiendra en résolvant l'équation (7) par rapport à Q_1

$$Q_1 = \frac{(Q' - P)}{0{,}55} = 1{,}82(Q' - P) \tag{9}$$

Conduites à diamètre variable. — Nous pourrions faire ici la théorie des conduites à diamètre variable, mais elle est sans grande utilité pratique, puisqu'on emploie toujours des tuyaux cylindriques, et que par suite on ne peut obtenir pour les diamètres des variations continues.

On trouvera cette théorie des conduites à diamètre variable dans le traité de Dupuit qui, du reste, a soin de faire remarquer lui-même le peu d'utilité de la question.

Il y a presque toujours avantage à adopter un diamètre constant pour une conduite principale, car il peut toujours arriver qu'on demande exceptionnellement à une conduite un service d'extrémité qu'on ne pourra réaliser qu'avec un diamètre constant.

Du reste, si une conduite principale paraît devoir être construite avec des diamètres décroissants, on la divisera en plusieurs sections, et chacune d'elles sera traitée comme une conduite à diamètre constant à laquelle on pourra appliquer les formules précédentes.

Conduite simple à diamètre et à débit variable. — La figure 5 représente une conduite simple à diamètre et à débit variables; le diamètre varie par transitions brusques, et le débit varie de même parce qu'on établit de place en place des prises d'eau avec robinets r_1, r_2.

Si l'on part du réservoir alimentaire A et que l'on suive le cours de la conduite, il est facile d'apprécier les pertes de charge successives.

Sur la longueur l_1 qui précède le robinet r_1, le débit ne varie pas et on peut le calculer ainsi que la vitesse moyenne u_1; une première perte de charge, égale à $\frac{1}{2}\frac{u_1^2}{2g}$, se produit par la contraction de la veine à l'entrée dans la conduite; cette perte de charge est minime par rapport à la perte de charge principale déterminée par les frottements; la valeur jl_1 de cette dernière est donnée par l'expression $\frac{b_1 u^2 l_1}{r}$.

On connaît par là la quantité totale y_1 dont s'abaisse la ligne de charge lorsqu'on passe du réservoir A au robinet r_1.

Quand on s'est de nouveau avancé de la longueur l_2, on rencontre un rétrécissement du tuyau auquel correspond une perte de charge produite par le choc et égale à $\frac{(u_3-u_2)^2}{2g}$; ajoutant la charge absorbée par les frottements sur la longueur l_3, on obtient la quantité dont la ligne de charge s'abaisse dans l'intervalle l_3, on connaît donc l'abaissement y_3 que la charge a subi depuis le réservoir A.

Opérant ainsi de proche en proche, on construit rapidement le polygone qui

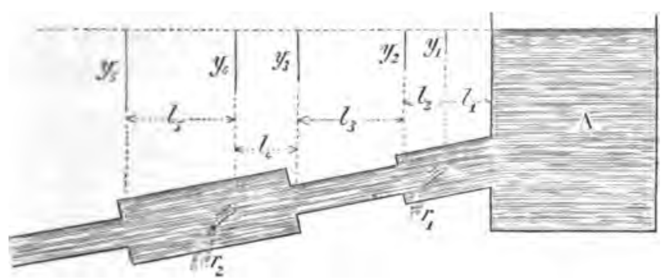


Fig. 5.

représente la ligne de charge, et en chaque point l'on sait à quelle hauteur peut s'élever l'eau de la conduite. Comme il faut toujours une certaine charge pour que l'écoulement se produise, les orifices de prise d'eau doivent se trouver au-dessous de la ligne de charge.

Avec les robinets et orifices dont on se sert dans la pratique, il convient de ménager sur chaque orifice d'écoulement une charge de $0^m,50$ au moins.

Il va sans dire qu'à cette charge il faut ajouter celle qui est consommée par le frottement dans la conduite secondaire qui joint l'orifice à la conduite principale; cette conduite secondaire se compose généralement d'un tuyau en plomb de petit diamètre, elle absorbe une charge assez considérable, et il convient d'en tenir soigneusement compte; la contraction à l'entrée de la conduite secondaire ou branchement détermine, ainsi que nous l'avons vu, une perte de charge double de la hauteur due à la vitesse moyenne de l'eau dans cette conduite.

Le problème qui consiste, étant donné un réservoir et une conduite, à calculer jusqu'à quelle hauteur le liquide s'élèvera en un point quelconque de la conduite ou d'un branchement de diamètre donné, ce problème est donc facile à résoudre.

Mais, dans la pratique, c'est plutôt le problème inverse qui se pose : on est en présence d'orifices de sujétion, les points élevés d'une rue, par exemple, et il faut que l'eau les atteigne avec une charge suffisante pour l'écoulement, on doit calculer en conséquence les diamètres de la conduite. C'est par tâtonnements qu'on opère ; on connaît le débit et la charge en chaque point, on peut donc calculer le diamètre de la conduite correspondante. Chaque portion de conduite est traitée comme une conduite simple à diamètre et à débit constants ; dans une première opération, on néglige les pertes de charge secondaires dues aux contractions, aux branchements et aux variations brusques de diamètre ; on établit ainsi les dimensions de la conduite, puis on cherche si, en tenant compte de toutes les pertes de charge, elles donneront un résultat satisfaisant, et si l'eau pourra parvenir à tous les points où l'on veut la conduire.

Calcul des conduites complexes ou d'un système entier de conduites. —

Le calcul d'un système entier de conduites ne présente pas plus de difficultés que le précédent.

1er Problème. — 1° Si le système est donné avec toutes ses dimensions, avec les niveaux des réservoirs alimentaires, et qu'on veuille déterminer en chaque point la charge et le débit, on opère de proche en proche sur les tuyaux succes ifs. On suppose déterminée en chaque point d'embranchement de la conduite principale la hauteur de la charge, et comme on peut, dans une première approximation, négliger les pertes secondaires dues aux branchements, on admet qu'en chaque point, sur lequel plusieurs tuyaux se soudent, la charge est la même pour tous ces tuyaux. S'il existe n points d'embranchement dans le système, on a donc n inconnues y qui sont les hauteurs des niveaux piézométriques en ces n points.

Un tuyau quelconque aboutit soit à un réservoir dont le niveau est donné, soit à un point d'embranchement dont la charge y est supposée connue ; on est donc censé connaître la charge aux deux extrémités de ce tuyau, et comme ses dimensions sont données, on calcule la dépense q par les formules relatives aux conduites simples. De la sorte, s'il existe m tuyaux, on établit m équations qui renferment $(m+n)$ inconnues, savoir :

Les n valeurs des charges y aux points d'embranchement ;

Les m valeurs des dépenses q dans les m tuyaux du système.

D'autre part, si l'on considère le premier tronçon de la conduite principale qui prend l'eau au réservoir, on peut en déterminer le débit par la formule ordinaire ; on a de la sorte le volume qui arrive au premier point d'embranchement ; on exprime que ce volume est égal à la somme des volumes qui s'écoulent par tous les tuyaux aboutissant à l'embranchement considéré, et il en résulte une première équation.

Une équation analogue correspond à chacun des n points d'embranchement. Cela fait donc n équations nouvelles, et nous avons $m+n$, équations qui nous suffisent pour déterminer nos $m+n$ inconnues.

On pourra se contenter presque toujours du calcul approximatif que nous venons d'indiquer. Cependant, si l'on veut tenir compte des pertes de charge secondaires, on les évaluera par les résultats du premier calcul, et on corrigera en conséquence les valeurs trouvées pour les charges à l'extrémité de chaque tuyau. Avec ces charges rectifiées, on recommencera les calculs qui conduiront à des résultats plus approchés.

La solution du problème paraîtra plus nette et plus simple lorsque le lecteur en aura fait quelque application numérique.

On ne sera jamais embarrassé sur le point de savoir dans quel sens l'écoulement se produira dans tel ou tel tuyau ; l'écoulement va toujours du niveau piézométrique le plus élevé vers le plus bas, quelle que soit l'inclinaison du tuyau.

2e Problème. — *On donne le plan et le nivellement d'un système de conduites avec les niveaux des bassins d'alimentation, calculer les diamètres des divers tuyaux de manière à obtenir pour chacun une dépense déterminée.* — C'est le problème inverse du précédent ; pris dans toute sa généralité, il comporte une infinité de solutions. Prenons pour inconnues les valeurs de la charge y aux n points d'embranchement, et supposons d'abord ces quantités connues. Pour chaque tuyau, nous aurons les charges à ses extrémités, et nous pourrons établir l'équation relative aux conduites simples. Cela nous donnera autant d'équations que de tuyaux, soit m équations renfermant $(m+n)$ inconnues, qui sont les charges y et les rayons r des conduites.

Quant aux n équations de dépense qui expriment qu'en chaque embranchement le débit de la conduite maîtresse se répartit entre tous les tuyaux qu'elle alimente, comme les m dépenses sont des données du problème, il ne reste plus que des équations de condition, des égalités auxquelles les données doivent satisfaire, mais qui ne peuvent servir à déterminer les inconnues.

Nous n'avons donc en tout que m équations pour déterminer $m+n$ inconnues, de sorte que le problème n'a pas une solution unique ; si on adopte pour les charges y aux n points d'embranchement des valeurs quelconques et qu'on les porte dans les équations des tuyaux, celles-ci ne renfermeront plus comme inconnues que les rayons ; il y aura autant d'équations que d'inconnues, et l'on obtiendra les valeurs cherchées des rayons.

Que l'on prenne pour point de départ un système différent de valeurs de y, on obtiendra de nouvelles valeurs pour les rayons des tuyaux, et par suite un nouveau système de conduites.

Il va sans dire qu'en opérant ainsi d'une manière arbitraire, et en choisissant à l'aveugle les hauteurs des n colonnes piézométriques, on se heurtera à des impossibilités, ou bien on arrivera à donner à certaines conduites des diamètres disproportionnés à leur dépense. Les solutions obtenues pourront être théoriquement possibles, mais pratiquement inadmissibles.

Il faut donc trouver un moyen de faire cesser l'indétermination. On y arrive par la recherche de la dépense *minima*.

Système conduisant au minimum de dépense. — Nous avons déjà vu que le prix d'établissement d'une conduite était sensiblement proportionnel à son rayon, et pouvait approximativement se représenter à Paris par la formule $200.r$, de sorte que le prix d'une conduite de longueur l est égal à $200.r.l$, et si on a un système de plusieurs conduites ayant les rayons r, r_1, r_2, et les longueurs l, l_1, l_2, la dépense sera proportionnelle à

$$rl+r_1l_1+r_2l_2 \ldots\ldots \text{ ou à } \Sigma(rl).$$

pour rendre la dépense *minima*, on devra rendre *minima* la quantité $\Sigma(rl)$.

Considérons, figure 6, un point d'embranchement A où la charge est égale à y.

Un nombre quelconque de tuyaux ayant pour rayons r_1, r_3, r_5, et pour charges à l'origine y_1, y_3, y_5, amènent de l'eau en A; un nombre quelconque d'autres tuyaux ayant pour rayons r_0, r_2, r_4, et pour charges extrêmes y_0, y_2, y_4, emportent l'eau loin de A.

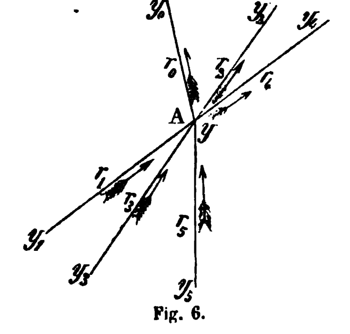


Fig. 6.

Pour que l'écoulement ait réellement lieu dans le sens que nous venons de dire et qui est indiqué par les flèches, il faut que la charge y sur l'embranchement soit inférieure aux charges y_1, y_3, y_5, et supérieure aux charges y_0, y_2, y_4.

Pour les tuyaux dont l'écoulement converge vers A, les charges par mètre courant se trouvent respectivement exprimées par

$$\frac{y_1-y}{l_1} \quad \frac{y_3-y}{l_3} \quad \frac{y_5-y}{l_5} \ldots\ldots$$

et, pour ceux dont l'écoulement est en sens contraire, par :

$$\frac{y-y_0}{l_0} \quad \frac{y-y_2}{l_2} \quad \frac{y-y_4}{l_4} \cdots\cdots$$

Les équations fondamentales

$$rj = b_1 u^2 \quad \text{et} \quad q = \pi r^2 . u$$

de l'écoulement uniforme dans un tuyau cylindrique, donnent

$$(1) \qquad r^5 = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 . j}, \quad \text{ou} \quad r^5 = k . \frac{q^2}{j}$$

car on peut admettre dans un calcul de ce genre que le coefficient de résistance b_1 est constamment égal à sa valeur moyenne.

Dans chacun des tuyaux du système qui nous occupe, le débit est donné, la charge seule est inconnue puisque y est indéterminée, cependant nous avons établi plus haut les valeurs de la charge moyenne j par mètre courant.

Les relations précédentes donnent :

$$\frac{\Sigma(rl)}{\sqrt{k}} = l_1 \sqrt[5]{\frac{q_1^2 l_1}{y_1 - y}} + l_3 \sqrt[5]{\frac{q_3^2 l_3}{y_3 - y}} + \cdots\cdots + l_0 \sqrt[5]{\frac{q_0^2 l_0}{y - y_0}} + \cdots\cdots$$

telle est la quantité qu'il faut rendre minima.

La variable étant la charge y, l'expression précédente atteindra son minimum lorsque sa dérivée par rapport à y sera nulle, ce qui nous conduit à l'équation :

$$(2) \qquad l_1^{\frac{6}{5}} q_1^{\frac{2}{5}} (y_1 - y)^{-\frac{6}{5}} + \cdots\cdots - l_0^{\frac{6}{5}} q_0^{\frac{2}{5}} (y - y_0)^{-\frac{6}{5}} - \cdots\cdots = 0$$

D'après l'équation (1), les charges totales telles que $(y_1 - y)$ ou $(j_1 l_1)$ sont proportionnelles à $\left(\frac{q_1^2 l_1}{r^5_1}\right)$; cela permet de donner à l'équation (2) la forme

$$(3) \qquad \frac{r_1^6}{q_1^2} + \frac{r_3^6}{q_3^2} + \cdots\cdots - \frac{r_0^6}{q_0^6} - \frac{r_2^6}{q_2^6} - \cdots\cdots = 0$$

L'équation (2) ne renferme comme inconnue que y ; on pourra en calculer la valeur par une série de tâtonnements et à cette valeur correspondra le minimum du prix d'établissement des conduites aboutissants à l'embranchement. On répètera le calcul pour chacun des embranchements. Les valeurs d'y étant ainsi déterminées, les n équations des tuyaux permettront d'en calculer les n rayons.

En particulier, si nous appliquons l'équation (3) à deux tuyaux placés bout à bout et ayant le même débit, système qui représente un tuyau à diamètre variable, nous trouvons que le minimum des frais d'établissements sera réalisé lorsque $r_1^6 = r_0^6$ ou $r_1 = r_0$, ce qui signifie que le tuyau le plus économique pour un débit uniforme déterminé est le tuyau à diamètre constant. Nous avions déjà trouvé ce résultat.

En somme, l'analyse précédente donnée par M. Bresse dans son cours d'hydraulique n'est pas d'un grand secours dans la pratique parce qu'elle conduit à des formules trop compliquées.

En réalité, c'est par tâtonnement et par expérience que l'on procède ; on se donne les rayons des divers tuyaux, on fait le calcul des charges et des débits et, d'après les résultats trouvés, on modifie les rayons primitivement adoptés. On calcule d'abord les conduites maîtresses, puis on passe successivement aux conduites secondaires et aux branchements. L'étude des distributions d'eau antérieures, des avantages et des inconvénients qu'elles ont présentés, guide le constructeur et lui indique dans chaque cas les dispositions générales qu'il convient d'adopter.

CONDUITES COMPLEXES AVEC RÉSERVOIRS

Réservoirs destinés à augmenter le débit momentané des conduites. — Le débit maximum d'une conduite simple, à mouvement uniforme, est donné par la formule

$$q^2 = \frac{\pi^2 . j . r^5}{b_1}.$$

La charge (j) par mètre courant sur l'orifice O (figure 7) est égale à $\left(\frac{h}{l}\right)$ et l'équation du débit se met sous la forme

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}}.$$

Il arrive souvent, dit Dupuit, que ce débit, très-suffisant comme débit journalier, ne l'est pas comme débit momentané. Supposons, par exemple, qu'il s'a-

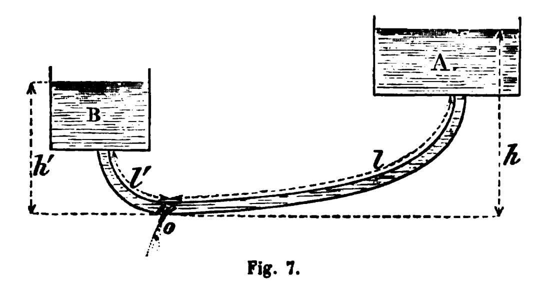


Fig. 7.

gisse d'un établissement de bains consommant 50 mètres par jour, il est clair qu'une conduite donnant un litre par seconde serait suffisante pour la consommation journalière, puisqu'elle fournirait plus de 86 mètres cubes par jour ; mais elle ne le serait pas dans le moment où l'on voudrait remplir à la fois plusieurs baignoires ou plusieurs chaudières ; on remédie à cet inconvénient par l'établissement d'un réservoir B près de l'orifice. Ce réservoir s'emplit pendant le chômage des robinets et leur permet de débiter de grandes masses d'eau à la fois.

Si l' est la longueur de la conduite qui relie le réservoir B à l'orifice et si h'

est la charge correspondante, le débit total en O sera :

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}} + \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h'}{l'}}$$

h' ne sera jamais bien considérable, mais l' peut être très-faible et alors le débit prendra une valeur considérable jusqu'à épuisement du réservoir supplémentaire B.

Les réservoirs, ajoute Dupuit, constituent aussi une excellente précaution contre les incendies et c'est pour cela que tous les établissements publics et industriels en sont pourvus. Supposons, par exemple, qu'un incendie se déclare dans un quartier où la conduite ne peut amener que 20 litres par seconde ; c'est en vain que, pour augmenter la masse d'eau disponible, on ouvrira tous les orifices branchés aux environs, ils ne feront jamais que se partager la quantité d'eau amenée par la conduite ; il pourra même arriver que ce partage se fasse d'une manière très-vicieuse en donnant plus d'eau aux points les plus éloignés, tandis que les plus voisins en manqueront ; c'est ce qui arrive quelquefois à Paris et fait croire à un manque d'eau dans les réservoirs alimentaires, tandis qu'il n'y a qu'une fausse manœuvre de robinets. Un autre avantage des réservoirs, c'est de ne pas faire souffrir les établissements, qui en sont munis, d'une courte interruption de service, par suite de réparations dans les conduites d'alimentation. C'est dans ce but que les distributions, dans ces établissements, se font presque toujours au moyen de branchements spéciaux pris sur leurs réservoirs particuliers. Ces réservoirs sont alimentés par une conduite, que ferme un clapet lorsque l'eau cesse d'y arriver, ou plus ordinairement par une conduite qui dégorge dans leur partie supérieure, auquel cas les robinets sont desservis par un ou plusieurs branchements partant de ces réservoirs.

Les grands réservoirs publics jouent un rôle analogue dans les distributions, ils augmentent la puissance des conduites ou permettent d'en réduire les diamètres.

Orifice alimenté par deux réservoirs. — Considérons un orifice O alimenté

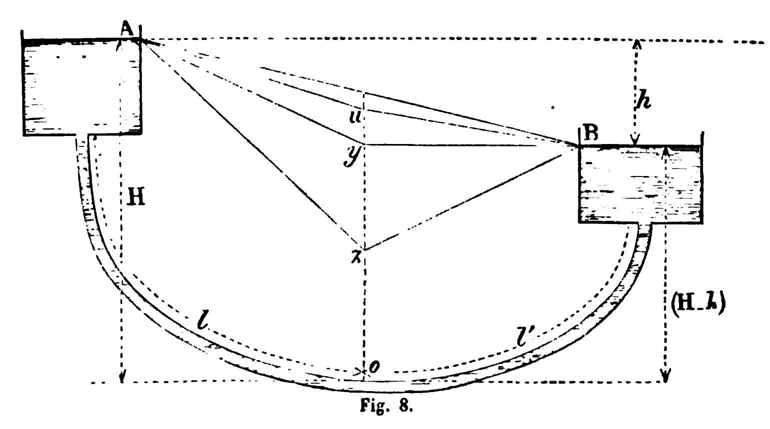


Fig. 8.

par deux réservoirs, A et B (figure 8), dont la différence de niveau est h. Cet orifice est situé à une hauteur H au-dessous du niveau du réservoir A.

Supposons l'orifice fermé, nous avons une conduite réunissant deux réservoirs à niveau différent, système que nous avons étudié, page 15.

En désignant par $(l+l')$ la longueur de la conduite qui réunit les deux réservoirs[1], il passe du réservoir A dans le réservoir B un volume d'eau donné par l'équation :

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{l+l'}{h}},$$

et la ligne de charge est la droite AB.

A ce moment, on ouvre très-peu le robinet O afin de livrer passage à un faible débit q_1, le mouvement de l'eau de A vers B n'est pas arrêté pour cela et il arrive encore en B un volume d'eau q' moindre que q.

Cherchons la relation qui existe entre les trois débits $q\ q_1\ q'$:

A cet effet, nous allons étudier l'écoulement dans une conduite qui, partant d'un réservoir, se bifurque et se termine à deux réservoirs de niveau différent.

Conduite bifurquée alimentant deux réservoirs de niveau différent. — Un réservoir A alimente une conduite qui se bifurque en O et lance une branche vers un bassin M et l'autre branche vers le bassin N. Le niveau en M est à une hauteur

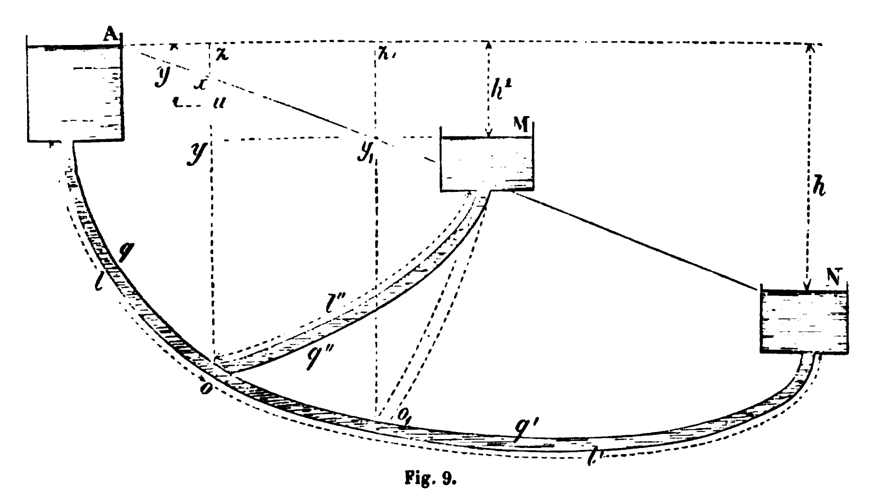


Fig. 9.

h' et le niveau en N à une hauteur h au-dessous du niveau dans le bassin A. Désignons par $l\ l'\ l''$ les longueurs des conduites AO, ON, OM et par $q\ q'\ q''$ leurs débits.

Supposons d'abord l'orifice M fermé, le réservoir A alimentera le bassin N et la ligne de charge sera représentée par la droite AN ; la charge disponible au point O aura donc pour mesure la verticale Ox.

Menons l'horizontale My du niveau d'eau dans le bassin M ; si le point y est au-dessous de x, il y a une charge représentée par xy entre O et M et l'écoulement se produit vers le bassin M ; si le point y se confond avec x, l'équilibre hydrostatique s'établit et l'eau reste stationnaire dans le bassin M, c'est ce qui

[1] Dans la pratique, ce n'est jamais la longueur absolue d'une conduite que l'on considère, mais tout simplement sa projection horizontale mesurée à l'échelle sur le plan de distribution ; les pentes sont toujours très-faibles et la longueur réelle diffère peu de la projection. S'il s'agissait d'un court branchement ascendant, il va sans dire qu'il faudrait prendre la longueur réelle du tuyau.

aura lieu lorsque le branchement O avancera sur la conduite jusqu'en O_1 ; si le point y est au-dessus de x, l'excès de charge existe dans le bassin M et l'écoulement se produit de M vers O, de sorte que le bassin M devient réservoir d'alimentation, c'est ce qui arrive si le branchement O s'éloigne encore du réservoir A et dépasse le point O_1.

Lorsque l'eau reste stationnaire, c'est-à-dire lorsque le branchement est en O_1, la perte de charge y_1z_1 depuis A est égale à h' et les triangles semblables donnent :

$$\frac{h'}{h}=\frac{l}{l+l'}$$

Quand xz sera moindre que $\frac{hl}{l+l'}$, l'écoulement se fera de O vers M

— plus grande — — M vers O.

Le sens de l'écoulement est indépendant de la longueur l'' de la conduite qui alimente le bassin M.

Nous admettons que les trois conduites ont le même diamètre, parce que, dans le cas où l'un des diamètres différerait, on chercherait une conduite équivalente ayant le diamètre voulu.

La formule $j=\frac{b_1q^2}{\pi^2r^5}$ donne la perte de charge par mètre courant pour une conduite à écoulement uniforme. Appliquant cette équation aux trois conduites simples AO, OM, ON, et désignant par y la perte de charge inconnue qui se produit entre le réservoir A et l'embranchement O il vient :

$$(1) \qquad y=\frac{b_1}{\pi^2}\frac{q^2l}{r^5} \quad h'-y=\frac{b_1}{\pi^2}\frac{q''^2l''}{r^5} \quad (h-y)=\frac{b^1}{\pi^2}\frac{q'^2l'}{r^5}\,;$$

ajoutant ces équations deux à deux pour éliminer la hauteur inconnue uz ou y et exprimant que le débit q est la somme des débits q' et q'', on obtient les trois équations :

$$(2)\quad \left\{\begin{aligned} h&=\frac{b_1}{\pi^2r^5}(q^2l+q'^2l') \\ h'&=\frac{b_1}{\pi^2r^5}(q^2l+q''^2l'') \\ q&=q'+q''. \end{aligned}\right.$$

Ces trois équations résolues par tâtonnement nous donneront les valeurs de $q\ q'$ et q''.

Si l'on tire les valeurs de $q\ q'\ q''$ des équations (1), et qu'on les porte dans la dernière des équations (2), celle-ci deviendra :

$$(3) \qquad \sqrt{\frac{y}{l}}=\sqrt{\frac{h'-y}{l'}}+\sqrt{\frac{h-y}{l''}}$$

c'est une équation du second degré facile à résoudre par rapport à y. Cette quantité étant connue, les équations (1) fourniront immédiatement les valeurs des trois débits.

Mais on peut transformer les équations (2) de manière à trouver une valeur approximative des débits :

A cet effet désignons par Q le débit de la conduite, l'orifice O étant fermé, c'est-à-dire le volume que le réservoir A enverrait au bassin N si le branchement n'existait pas, nous avons, d'après l'équation fondamentale, la relation :

(4) $$Q^2 = \frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h}{l+l'}$$

Tirant de l'équation (4) la valeur de h et la portant dans la première des équations (2), nous trouvons :

$$Q^2 (l+l') = q^2 l + q'^2 l'$$

et, si nous remplaçons q par sa valeur $q'+q''$, nous aurons une équation du second degré qu résolue par rapport à q' donne, en adoptant la racine positive :

$$q' = -\frac{lq''}{l+l'} + \sqrt{Q^2 - \frac{q''^2 ll'}{(l+l')^2}}$$

La somme $(l+l')$ étant constante et égale à L, le maximum du produit ll' est égal à $\frac{L^2}{4}$ et le maximum de la fraction $\frac{ll'}{(l+l')^2}$ est égal à $\frac{1}{4}$.

En outre, on admet que le débit q'' est faible par rapport à Q, il est du reste toujours plus petit que Q ; on peut donc prendre d'une manière approximative

(5) $$\begin{cases} q' = Q - \dfrac{lq''}{l+l'} \\ \text{et} \quad q = q'+q'' = Q + \dfrac{l'q''}{l+l'} \end{cases}$$

pour résoudre ces équations, il faudrait avoir la valeur du débit q''. Or, nous savons que la charge sur le branchement O est intermédiaire entre la charge Ox qui correspond au cas où le branchement est fermé et la charge Oy qui correspond au cas où l'équilibre hydrostatique s'établirait dans la branche OM. Le débit q est donc inférieur à $\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h'}{l}}$ et le débit q' est supérieur à $\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h-h'}{l'}}$, donc le débit q'' est inférieur à la quantité :

$$\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h'}{l}} - \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h-h'}{l'}}$$

Nous calculerons cette limite maxima du débit q'' et nous substituerons dans les égations (5) des nombres décroissant au-dessous de cette limite, nous obtiendrons les valeurs correspondantes de q et de q', et nous nous arrêterons lorsque ces valeurs seront telles que la relation $q = q' + q''$ se trouve vérifiée.

De l'équation (5) on tire un importante conséquence :

Lorsqu'on établit sur une conduite débitant un volume Q, à son extrémité, une prise d'eau d'un volume q'', *le débit d'extrémité n'est pas réduit du volume* q'', *mais de la moitié, du tiers, du quart... de ce volume suivant que l'orifice intermédiaire est pratiqué à la moitié, au tiers, au quart... de la conduite à partir du réservoir.*

Le débit de la conduite dans la partie qui précède l'orifice intermédiaire augmente donc de la moitié, des deux tiers, des trois quarts... du débit q''. Il va sans dire que ce débit q'' est relativement faible, par rapport au débit total d'extrémité Q; c'est seulement dans cette hypothèse que nous avons pu établir les équations (5).

Orifice alimenté par deux réservoirs. — Revenons maintenant à l'orifice O (*fig.* 8) alimenté par les deux réservoirs A et B. Le robinet O étant peu ouvert de manière à livrer passage à un faible débit q_1, il n'arrivera plus au réservoir B, d'après l'équation (5), qu'un volume :

$$q' = q - \frac{lq_1}{l+l'}$$

tandis que, le robinet o étant fermé, il arrivait en B, un volume;

$$q = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \frac{h}{l+l'}}$$

La ligne de charge qui était d'abord la droite AB devient une ligne brisée AuB.

A mesure que le débit q_1 augmente, la charge disponible Ou s'abaisse et elle atteint l'horizontale By du réservoir B, lorsque le débit q_1 devient égal à

$$\sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}} \quad \text{ou à} \quad q\sqrt{\frac{l+l'}{l}}$$

quantité que nous représenterons par A; à ce moment l'équilibre hydrostatique s'établit entre l'orifice O et le réservoir B.

Enfin, lorsque le débit q_1 dépasse la valeur précédente, le sommet de la colonne piézométrique en O descend au-dessous de l'horizontale du bassin B et vient en z, de sorte que les deux réservoirs A et B concourent à l'alimentation de l'orifice O.

L'orifice étant complètement ouvert, la charge est nulle sur cet orifice et le débit atteint son maximum. A gauche de l'orifice O, c'est le réservoir A qui alimente la conduite et qui produit sur l'orifice une charge égale à H, il y a donc entre cette charge et le débit correspondant la relation :

$$H = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} q^2 l.$$

A droite, c'est le réservoir B qui alimente la conduite et qui produit sur l'orifice une charge égale à H — h, il y a donc entre cette charge et le débit correspondant la relation :

$$(H - h) = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} q'^2 l'$$

Ces deux équations nous permettent de calculer les débits q et q' et par conséquent le débit total de l'orifice qui est la somme des deux précédents.

Les deux volumes q et q' envoyés par les bassins à l'orifice seront égaux lorsque l'orifice O partagera la longueur horizontale $l+l'$ dans le rapport des charges H et (H — h).

On pourra chercher aussi en quel point il conviendrait de placer l'orifice O pour obtenir le débit maximum $q+q'$; en égalant à zéro la dérivée de cette somme et désignant par a la distance $(l+l')$ qui sépare les deux réservoirs, on trouve l'équation

$$\frac{\sqrt{H-h}}{\sqrt{(a-l)^3}} - \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{l^3}} = 0$$

qui, résolue par rapport à l, donnera la position de l'orifice de débit maximum. Cette question ne présente, du reste, pas d'utilité pratique et pourrait être assez rapidement résolue par tâtonnement.

Conduite alimentée par deux réservoirs. — Nous venons d'étudier l'écoulement par un large orifice qu'alimentent deux réservoirs. Nous allons considérer maintenant une conduite avec service de route, alimentée par deux réservoirs A et B.

Utilité d'un second réservoir. — Dans les distributions ordinaires, dit Dupuit, le débit des conduites n'est pas régulier; nul ou très-faible la nuit, il est variable pendant le jour, suivant les heures; par conséquent, le diamètre des conduites doit être tel qu'il satisfasse aux besoins dans le moment de leur plus grande exigence; on en conclut qu'il est possible de profiter des intermittences de la distribution pour alimenter des réservoirs d'extrémité ou intermédiaires, réservoirs qui fourniront à la consommation dans les moments où elle est la plus considérable. Il peut même résulter de cette disposition une augmentation sensible de la charge disponible. La ville de Paris offre un exemple de ce système de distribution. L'eau de l'Ourcq, amenée au bassin de la Villette au nord de Paris, traverse la vallée de la Seine dans des conduites qui se terminent sur la rive

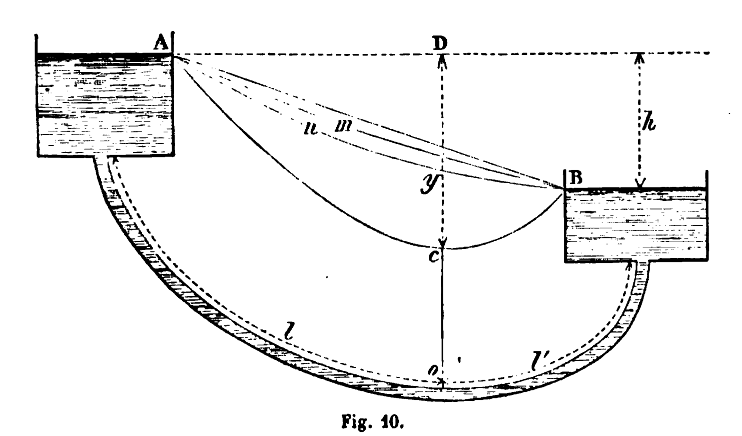


Fig. 10.

opposée par des réservoirs. La nuit, les conduites ne fournissant que peu d'eau en route, remplissent les réservoirs extrêmes, de manière que, pendant le jour, les conduites alimentées des deux côtés peuvent fournir à une consommation beaucoup plus considérable que si elles ne l'étaient que d'un seul.

Calcul de l'alimentation par deux réservoirs. — La figure 10 représente la conduite qui réunit les deux réservoirs A et B dont la différence de niveau est h.

S'il n'existait point de service de route, le réservoir A enverrait dans le ré-

servoir B une quantité d'eau

$$Q' = \sqrt{\frac{\pi^2 r^5}{b_1} \cdot \frac{h}{l}}$$

et la ligne de charge serait la droite AB. Mais, il existe un service de route, dont le cube total est Q_1 et un service d'extrémité P.

Et l'on a, entre les trois débits Q', Q_1 et P la relation suivante

$$(1) \qquad Q'^2 = P^2 + PQ_1 + \frac{1}{3} Q_1^2;$$

c'est l'équation (6 *bis*) que nous avons démontrée à la page 31.

L'équation (1) est du second degré par rapport à P et donne :

$$(2) \qquad P = \sqrt{Q'^2 - \frac{1}{12} Q^2} - \frac{1}{2} Q$$

et la ligne de charge est une parabole du 3[e] degré (AmB) qui n'est point tangente à l'horizontale en B.

Le second membre de l'équation (2) s'annule lorsque

$$Q = Q'\sqrt{3} = 1{,}73.Q';$$

à ce moment le débit d'extrémité est nul et le réservoir inférieur B cesse d'être alimenté.

Lorsque Q dépasse $Q'\sqrt{3}$, le débit d'extrémité devient négatif, c'est-à-dire que le bassin B devient lui-même réservoir d'alimentation de la conduite sur une certaine longueur : la ligne de charge prend la forme parabolique ACB.

Appelons L la longueur totale de la conduite,
— l la longueur alimentée par le réservoir A
— l' — — B
— o le point de partage entre l et l'
— y la perte de charge CD entre le réservoir A et le point O.

Si nous nous reportons à l'équation (5) de la page 30 qui exprime la relation entre la charge, le rayon d'une conduite, son service de route $\frac{Q}{l}$ par mètre courant et la distance x qui sépare du réservoir le point de la conduite considérée, nous aurons les relations suivantes :

(3) Pour la conduite AO. . . . . $y = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{Q^2}{L^2} \cdot \frac{l^3}{3}$

(4) Et pour la conduite BO. . . . . . $(y - h) = \frac{b_1}{\pi^2 r^5} \cdot \frac{Q^2}{L^2} \cdot \frac{l'^3}{3}$

(5) A ces deux équations il faut ajouter $L = l + l'$.

Nous avons donc trois relations entre les sept variables Y, Q, R, L, l, l', h et quatre de ces variables étant données on pourra déterminer les trois autres.

Supposons que les inconnues soient l, l' et r; résolvons les deux équations (3)

et (4) par rapport à l et l', et prenons le rapport de ces deux quantités, nous trouvons

$$\frac{l}{l'}=\frac{\sqrt[3]{y}}{\sqrt[3]{y-h}}; \text{ d'où } l=\mathrm{L}\frac{\sqrt[3]{y}}{\sqrt[3]{y}+\sqrt[3]{y-h}} \quad l'=\mathrm{L}\frac{\sqrt[3]{y-h}}{\sqrt[3]{y}+\sqrt[3]{y-h}}$$

quant au rayon r, on le tirera de l'équation (3) qui ne renferme plus que lui comme inconnue.

Lorsque la différence de niveau entre le réservoir A et les points bas de la conduite est très-grande par rapport à h, il en est de même de la perte de charge y, l et l' se rapprochent de $\frac{\mathrm{L}}{2}$ et le point de passage dans l'alimentation se trouve vers le milieu de la conduite.

Généralement, outre les trois inconnues précédentes : le rayon et les deux longueurs l et l', il existe une quatrième inconnue c'est la charge y. On la déterminera par tâtonnement de la manière suivante :

On se donnera plusieurs valeurs de y et on en déduira les valeurs correspondantes de $(l+l')$; on construira une courbe ayant pour abscisses y et pour ordonnées $(l+l')$; le point où cette courbe rencontre la parallèle à l'axe des abscisses menée à la hauteur L au-dessus de cet axe a précisément pour abscisse la valeur cherchée de y puisqu'à cette valeur correspond $l+l'=\mathrm{L}$.

Il va sans dire que la courbe en question ne se trace que d'une manière approximative et que quatre ou cinq points suffisent pour la déterminer.

Cette manière d'opérer deviendra plus claire par les applications que nous en ferons ultérieurement.

Ainsi, le réservoir B est un auxiliaire puissant de l'alimentation ; il emmagasine à chaque instant l'excès de liquide fourni par le réservoir A, et il lui vient en aide dans les moments où la dépense de route prend un accroissement accidentel ; il permet de réduire considérablement le diamètre des conduites maîtresses et par suite le prix de revient. Mais, il faut prendre garde que le diamètre de la conduite maîtresse ne soit pas réduit outre mesure ; il faut qu'elle puisse, pendant le chômage du service de route, réparer toutes les pertes qu'a subies le bassin B, pendant le temps où il concourait à l'alimentation ; c'est un point important dont il faut s'assurer par le calcul.

Le régime de la distribution a une grande influence sur les diamètres des conduites ; plus ce régime est variable, plus la dépense d'eau est irrégulière, plus il faut augmenter le diamètre ; le même débit, réparti régulièrement sur les vingt-quatre heures de la journée, exige le diamètre minimum. Il faut donc éviter autant que possible la production simultanée de toutes les causes de dépense qui se rencontrent sur le parcours de la conduite.

Conduite à plusieurs réservoirs. — Le calcul d'une conduite alimentée par plusieurs réservoirs échelonnés sur son parcours n'est pas plus difficile que le précédent : on traite séparément la section comprise entre le premier et le deuxième réservoir, puis la section comprise entre le deuxième et le troisième, et ainsi de suite. L'usage de ces réservoirs assure l'alimentation et permet d'abaisser singulièrement le diamètre des conduites. Cependant, il faut se rappeler une remarque importante ; le diamètre de la conduite qui va du premier au deuxième réservoir, doit être assez grand, non-seulement pour réparer les pertes subies par le second réservoir, lorsqu'il concourt à l'alimentation de la première section, mais encore pour emmagasiner tout le liquide nécessaire à la

consommation des sections suivantes. Il en est de même pour les autres réservoirs; chacun d'eux doit emmagasiner le cube nécessaire à tous ceux qui le suivent. Cette condition ne permet pas de réduire autant qu'on le voudrait le diamètre des conduites.

Influence prépondérante du diamètre des conduites. — C'est le diamètre des conduites qui exerce sur leur débit une influence considérable; on s'en rend compte à la seule inspection des formules. A moins de circonstances spéciales, il est inutile de faire de grandes dépenses pour augmenter la charge ou pour diminuer la longueur d'une conduite; en effet, le débit ne varie que proportionnellement à la racine carrée de l'augmentation de charge, ou à la diminution de longueur. L'influence du diamètre sur le débit est cinq fois plus importante, puisque ce débit est proportionnel à la puissance $\frac{5}{2}$ du diamètre. C'est la dimension qui joue le principal rôle.

Dupuit fait remarquer que : 1° si une conduite débite 100 litres, en doublant la charge elle en débitera 140, en la quadruplant elle en débitera 200; en doublant le diamètre elle débitera 560 litres, en le quadruplant 3200 litres; 2° l'influence du diamètre sur la perte de charge est encore plus considérable, puisqu'elle est proportionnelle à la puissance cinquième du diamètre; en doublant le diamètre, le produit est à peine sextuple, tandis que la perte de charge devient 32 fois plus petite.

DES ORIFICES QUI TERMINENT LES CONDUITES

Les formules relatives à l'écoulement de l'eau dans les conduites supposent que l'orifice terminal est la section même de la conduite, que celle-ci débouche directement dans l'atmosphère ou dans un réservoir. C'est, en effet, cette hypothèse qu'il faut adopter, puisque c'est elle qui correspond au débit maximum en vue duquel la conduite est faite; mais, dans la pratique, l'hypothèse de l'écoulement à pleine section ne se trouve qu'accidentellement réalisée; l'orifice terminal est étranglé au moyen d'un robinet, qui permet de proportionner le débit aux besoins du moment; la section réelle d'écoulement ne peut donc être déterminée; il serait difficile, fait remarquer Dupuit, de connaître sa grandeur par des mesures directes, grandeur qui serait encore à corriger par des coefficients de contraction, aujourd'hui complétement inconnus. De sorte qu'on règle expérimentalement l'ouverture des orifices pour avoir un certain débit; il y a alors une inconnue dans le problème, c'est la charge disponible sur le robinet ou la hauteur à laquelle l'eau pourrait jaillir par un orifice vertical.

Les pertes de charge que nous avons calculées et les lignes de charge, que nous avons construites, ne s'appliquent donc qu'au cas de l'écoulement à gueule bée par un orifice terminal; elles se trouvent modifiées, dans le cas où le courant est étranglé par un robinet; dans la pratique, les modifications résultant de cet étranglement ne sont jamais dangereuses, puisqu'elles ont toujours pour effet d'augmenter la charge disponible à l'amont du robinet. Tous les orifices de sujétion continuent donc à être desservis d'une manière certaine; la conduite joue en partie le rôle de réservoir, son diamètre est trop fort pour le débit momentané qu'on lui demande, mais il n'y a pas de mal à cela et il y aurait, au contraire, inconvénient à ce que la conduite ne pût satisfaire à un maximum accidentel de débit.

JETS D'EAU

C'est sur la variation de la charge avec l'étranglement de l'orifice terminal que sont fondés les jets d'eau.

Considérons un réservoir A alimentant une conduite, qui se termine au point C par un orifice dont l'axe est vertical.

Supposons d'abord qu'on place au-dessus de cet orifice un tube élevé, l'eau

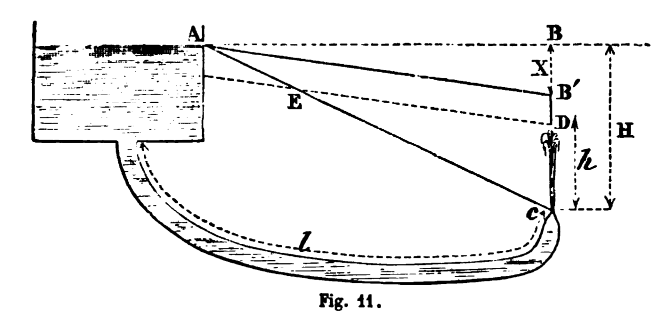


Fig. 11.

y montera jusqu'à ce qu'elle atteigne le niveau B du réservoir, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'équilibre hydrostatique s'établisse. La charge sur l'orifice C est représentée par la colonne CB.

Supposons maintenant que l'on recouvre l'orifice C d'un ajutage conique, terminé en pointe, de manière à ne laisser sortir l'eau que par un orifice de section incomparablement moindre que celle de la conduite ; la vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite sera très-faible et égale à u, les frottements détermineront une perte de charge :

$$X = jl = \frac{b_1 u^2 . l}{r}$$

Soit ($BB' = X$) ; prenons en outre, au-dessous de B' une hauteur B'D, égale à $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$, cette hauteur représente la perte de charge due à la destruction de la vitesse de la masse liquide, qui vient choquer l'ajutage conique.

Il ne reste donc, comme charge disponible sur l'orifice, qu'une hauteur CD, et la ligne de charge est la parallèle DE à B'A.

Le jet d'eau, qui s'échappera de l'ajutage conique, ne s'élèvera donc qu'à une hauteur h, donnée par l'équation :

$$h = H - \frac{b_1 u^2 l}{r} - \frac{u^2}{2g}$$

Généralement, la vitesse u est faible et on néglige le dernier terme du second membre, cela revient à considérer la hauteur CB', comme charge disponible, et à adopter B'A, comme ligne de charge.

Si l'ouverture de l'ajutage conique va en augmentant, la dépense augmente et avec elle la vitesse u, de sorte que les pertes de charge, à retrancher de H,

augmentent rapidement ; la charge disponible h diminue et il en est de même de la hauteur du jet d'eau.

Enfin, lorsque l'ajutage n'est plus que le prolongement de la section, la hauteur h devient nulle ; l'eau qui s'échappe de la conduite n'est animée que de la vitesse u, et le jet ne s'élève qu'à la hauteur $\frac{u^2}{2g}$, c'est-à-dire à une hauteur généralement très-faible. Alors la ligne de charge est représentée, comme nous savons, par la droite AC.

En réalité, la vitesse u n'est pas complétement absorbée par la contraction due à l'ajutage, et il ne faudrait retrancher dans le second membre de l'équation (1) qu'une quantité $\alpha\,\frac{u^2}{2g}$, dans laquelle α est un coefficient moindre que l'unité ; mais il est plus simple de ne pas tenir compte de ce terme, généralement peu important dans les conduites disposées spécialement pour l'alimentation de jets d'eau.

La hauteur h du jet d'eau, déduite de l'équation (1), est un peu trop forte ; elle se trouve atténuée dans la réalité par la résistance de l'air et aussi par le choc des molécules liquides qui retombent.

D'Aubuisson, d'après ses expériences, avait conclu que la hauteur réelle h' du jet d'eau était donnée par la formule :

(2) $$h' = h - 0{,}01.h^2$$

Darcy a repris les expériences relatives à cet objet : il a montré que le coefficient de réduction de la valeur théorique h se rapprochait de l'unité, à mesure que le diamètre du jet augmentait :

Ainsi, pour un orifice de 0m,015 de diamètre, on avait. . . $h' = 0{,}93.h$
Et pour un orifice de 0m,05. . . . . $h' = 0{,}95.h$

Le coefficient de réduction par lequel il faut multiplier la hauteur piezométrique, pour avoir celle du jet, n'est donc point constant ; il est probable qu'il varie, non-seulement avec le diamètre de l'ajutage, mais encore avec le diamètre de la conduite alimentaire.

Pour des orifices très-petits avec des charges considérables, le coefficient de réduction serait encore inférieur aux nombres précédents.

La hauteur d'un jet d'eau est du reste soumise, comme les lignes de charge, à des oscillations continuelles ; dans les expériences de Darcy, la hauteur moyenne n'a été que les 0,96 de la hauteur maxima calculée par les formules précédentes.

INFLUENCE DU PROFIL EN LONG D'UNE CONDUITE SUR SON DÉBIT

Dans tout ce qui précède, nous n'avons point parlé du profil en long des conduites ; il était inutile de le faire, car, du moment que l'écoulement a lieu à pleine section, la résistance ne dépend que de la longueur et du diamètre.

La direction en plan a bien son influence sur le débit, mais elle est sans importance, ainsi que nous l'avons dit en parlant des coudes.

L'influence du profil en long n'est pas appréciable non plus, lorsque ce profil est peu accidenté; cependant, elle se fait sentir dans certains cas, et il importe d'avoir sur elle des notions précises.

On a toujours recommandé, dit Darcy, de poser, autant que possible, les conduites de telle façon qu'elles ne présentent aucun point haut, depuis leur sotare au bassin alimentaire jusqu'au point de dégorgement; en effet, ces points hauts, qui se trouvent à l'intersection des pentes de signe contraire, favorisent d'abord l'emprisonnement de l'air lorsqu'on met les conduites en charge et, en second lieu, l'accumulation de celui que l'eau tient en suspension.

Ces obstacles diminuent donc la section du tuyau dont le débit, dès lors, est inférieur à celui donné par les formules. On les fait disparaître au moyen de robinets à air, ou par des tuyaux ouverts implantés sur la conduite et suffisamment élevés, ou, enfin, par des soupapes et ventouses à flotteur convenablement disposés. Mais ces appareils, utiles en général, produiraient un effet contraire à celui qu'on attend d'eux dans une infinité de circonstances.

Il existe certains profils qui, s'ils étaient adoptés pour la pose d'une conduite, rendraient impossible le dégagement de l'air accumulé dans les points hauts, attendu que l'air extérieur entrerait par les robinets, les tuyaux ouverts, les soupapes et les ventouses, et modifierait ainsi complètement les conditions de l'écoulement. Dans ces profils, il convient d'éviter absolument les pentes et les contre-pentes. On verra de plus qu'il faut éviter à tout prix ces profils, car le débit qui les accompagnerait, lors même qu'ils seraient tracés suivant des pentes se succédant toujours avec le même signe, serait soumis aux variations que l'introduction de l'air cause à l'écoulement des liquides dans les siphons.

Influence de la pente d'une conduite sur les pressions intérieures. — 1er *Cas, où la pression intérieure est supérieure à la pression atmosphérique.* — Considérons un réservoir figure 12, alimentant une conduite horizontale de longueur L, et soit H la hauteur d'eau dans le réservoir au-dessus de la naissance de la conduite. La vitesse d'écoulement dans le tuyau est u et la hauteur génératrice de cette vitesse est $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$, de sorte qu'entre la surface aa de l'eau dans le réservoir et l'extrémité c de la conduite, la charge H est absorbée : 1° par les frottements; 2° par la production de la vitesse u.

Négligeons la perte de charge due à la contraction, à l'entrée du tuyau, et considérons seulement celle qu'engendre le frottement sur les parois; cette perte de charge est proportionnelle à la longueur parcourue.

Prenons une hauteur ad égale à $\left(\frac{u^2}{2g}\right)$; ce qui restera de la charge H, c'est-à-dire la hauteur db, représentera la charge totale absorbée par les frottements de l'origine à l'extrémité de la conduite. Menons la droite dc, ce sera la ligne des niveaux piézométriques; en un point quelconque e de la conduite, la hauteur piézométrique est ef, elle mesure le frottement qui reste à vaincre pour que le liquide passe de e en c, et cette hauteur piézométrique h est donnée par l'équation :

$$h=\left(H-\frac{u^2}{2g}\right)\frac{L-l}{L}$$

Cette valeur de h mesure la pression effective, résultant de la pression atmosphérique et de la pression de l'eau ; dans le cas d'une horizontale, cette pression est toujours positive, elle diminue à mesure qu'on s'avance vers l'extrémité où elle s'annule ; dans tout le parcours, la pression effective du liquide est

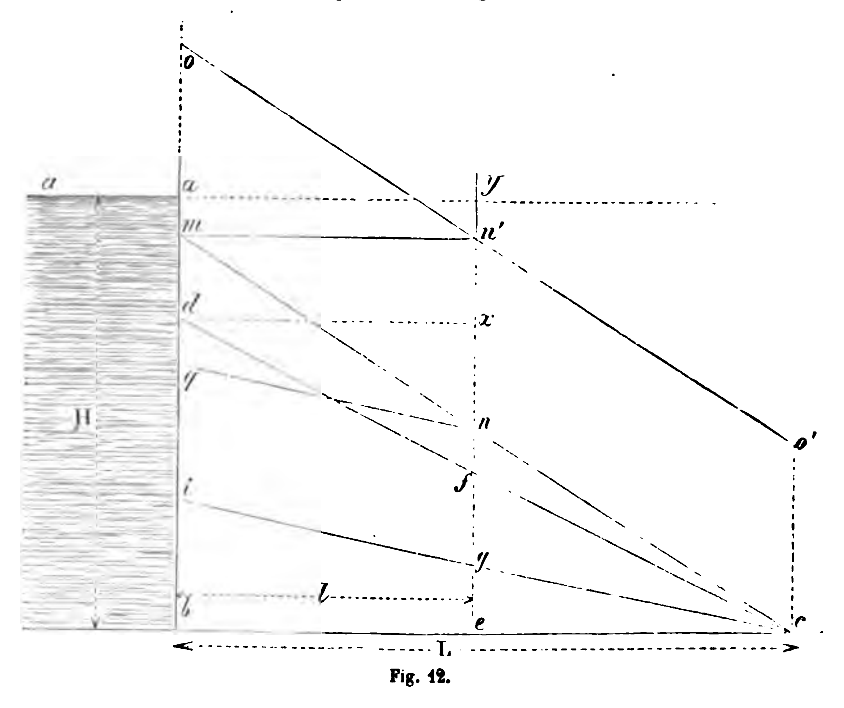


Fig. 12.

dirigée de l'intérieur à l'extérieur du tuyau et, si on en perce les parois, l'eau en sortira toujours sans que l'air extérieur tende à rentrer.

2e *Cas, où la pression intérieure est égale à la pression atmosphérique.* — Considérons, au lieu d'une conduite horizontale, une conduite inclinée précisément suivant la ligne dc, c'est-à-dire telle que $\left(H = \frac{u_2}{2g}\right)$, la hauteur piézométrique sera nulle en un point quelconque de cette conduite, c'est-à-dire que la pression atmosphérique s'exercera aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, et, si on perce les parois en un point quelconque, l'eau ne tendra pas à sortir ni l'air extérieur à rentrer ; c'est là un fait facile à vérifier par l'expérience.

Nous admettons toujours que la longueur de la conduite se confond avec la longueur de sa projection horizontale, quelle que soit l'inclinaison ; cette hypothèse est, en général, parfaitement fondée, car les pentes n'ont jamais une valeur absolue considérable, et, si l'on considère une ligne inclinée d'$\frac{1}{10}$, sa longueur est égale à celle de sa projection horizontale multipliée par 1,005 ; la différence est donc insensible dans la pratique.

Si donc nous considérons la conduite de longueur L, inclinée suivant la ligne dc, la vitesse de l'eau restera la même que dans la conduite horizontale, car cette vitesse ne dépend que de la longueur de la conduite et de la différence entre le niveau du réservoir et l'orifice extrême c ; la hauteur piézométrique est nulle dans tout le développement de la conduite dc, et l'eau trouve dans la pente

qu'elle parcourt les mêmes ressources, pour vaincre les frottements, que celles qui résultaient des diminutions progressives de hauteur des colonnes piézométriques, dans le cas de l'écoulement par le tuyau horizontal. On voit, en effet, que la différence de niveau entre deux points quelconques de la conduite inclinée, est précisément égale à la différence de hauteur des deux colonnes piézométriques correspondantes de la conduite horizontale.

Si l'on donne la conduite *ic* intermédiaire entre *dc* et l'horizontale *bc*, la hauteur piézométrique en un point quelconque sera positive et mesurée par la verticale *gf*, et cette hauteur, augmentée de la différence de niveau existant entre le point considéré et l'extrémité du tuyau, sera précisément égale à la hauteur piézométrique correspondante de la conduite horizontale ; par conséquent, les frottements seront pareillement surmontés.

Dans les trois cas que nous venons d'examiner, la vitesse d'écoulement et le débit sont les mêmes : le travail destiné à vaincre les frottements est produit, soit par la pente même de la conduite, soit par la variation des hauteurs piézométriques.

Il est facile de calculer l'inclinaison *dc*, suivant laquelle la pression à l'intérieur du tuyau est constamment égale à la pression atmosphérique : désignons par A la différence de niveau entre le réservoir et l'extrémité de la conduite, la pente de la conduite *dc* sera égale à :

$$\frac{A-\frac{u^2}{2g}}{L}.$$

D'un autre côté, nous avons

$$rj=b_1u^2 \quad \text{ou} \quad rjL=b_1L.u^2$$

La quantité jL représente la charge totale A, et l'équation précédente nous conduit à

$$\frac{rA}{b_1L}=u^2$$

ce qui nous permet de mettre l'expression de la pente sous la forme

$$A.\frac{1-\frac{r}{2g.b_1L}}{L}$$

Connaissant par les tables la valeur du coefficient b_1, nous calculerons facilement l'expression précédente, qui, du reste, diffère généralement peu de $\left(\frac{A}{L}\right)$, car la hauteur due à la vitesse u est faible relativement à la hauteur totale de chute A.

3° *Cas où la pression intérieure est moindre que la pression atmosphérique.* — Considérons maintenant une conduite *mc* plus inclinée que *dc* ; la charge consommée par le frottement sur la longueur *mn* est la même que celle qui était consommée sur la longueur égale *df* (ne pas oublier que les longueurs sont toujours confondues avec leurs projections horizontales) ; or, sur la longueur *df* la charge absorbée par les frottements était de *fx* ; donc elle est aussi mesurée par

fx pour la longueur *mn*, et comme la charge fournie par la pesanteur n'est que de *nx* puisque la production de la vitesse *u* absorbe la hauteur *xy*, le complément, soit *nf*, doit être représenté par une diminution de pression à l'intérieur de la conduite.

La pression, au point *n* de la conduite, est donc inférieure à la pression atmosphérique d'une quantité représentée par la verticale comprise entre la direction considérée *mc* et la direction *dc* qui correspond au cas où la pression intérieure est constamment égale à la pression atmosphérique.

Si l'on vient à percer la conduite au point *n* et à la surmonter d'un tube piézométrique, non-seulement l'eau ne s'élèvera pas dans le tube, mais la pression extérieure l'emportant sur la pression intérieure, c'est l'air qui pénétrera dans la conduite, et l'écoulement à pleine section ne pourra plus subsister.

Le raisonnement précédent suppose que l'écoulement à plein tuyau existe dans la conduite *mc*, et il reste à montrer comment on réalisera cette hypothèse dans la pratique.

Considérons d'abord le tuyau horizontal *bc*; lorsque l'eau y pénètre, elle le fait avec la vitesse due à toute la charge disponible, cette vitesse se ralentit par suite des frottements à mesure que l'eau s'avance vers l'extrémité du tuyau, les couches liquides successives se trouvent continuellement retardées, non-seulement elles ne tendent pas à se séparer les unes des autres, mais elles se pressent même, et l'écoulement à pleine section s'établit nécessairement.

L'eau qui pénètre dans le tuyau *dc* trouve toujours en passant d'une section à l'autre la pente nécessaire pour vaincre les frottements, la vitesse est partout la même; aucune tranche liquide ne marche plus vite que l'autre et ne tend à se séparer de sa voisine; la continuité de l'écoulement à pleine section est donc réalisée, mais cette continuité est sur le point de disparaître.

Pour toutes les inclinaisons comprises entre l'horizontale et *dc*, le ralentissement de vitesse a lieu depuis le réservoir jusqu'à l'orifice de la conduite, et l'écoulement à pleine section ne peut manquer de se produire.

Considérons maintenant la conduite *mc* plus inclinée que *dc*, l'eau qui y pénètre avec une certaine vitesse trouve une pente supérieure à celle qui est nécessaire pour vaincre les frottements, elle prend donc un accroissement de vitesse qui se traduit par une diminution de la section d'écoulement; le tuyau n'est plus rempli, et l'eau s'y écoule comme elle le ferait dans un canal cylindrique découvert.

Dans une conduite brisée, telle que *qnc*, n'ayant qu'une partie de sa longueur au-dessus de *dc*, l'écoulement à pleine section pourrait se produire de *q* en *n*, mais la vitesse en *n* serait toujours moindre que *u*, cette vitesse irait en augmentant de *n* en *c*, et l'écoulement à pleine section ne saurait se produire.

On voit donc que les conduites dont certaines parties dépassent la ligne *dc* diffèrent essentiellement de celles placées au-dessous de la même ligne, non-seulement en ce qui concerne les différences de pression supportées par les parois intérieures des tuyaux, mais encore en ce qui touche l'écoulement du fluide.

Il n'est cependant pas impossible de faire couler à pleine section les tuyaux, qui coulent à section incomplète lorsque l'eau s'y introduit d'une manière progressive. Il faut les fermer à leur extrémité inférieure lorsqu'on les met en charge, attendre que tout l'air en soit sorti, soit à l'aide de robinets, soit par l'extrémité supérieure, puis enfin, lorsqu'on ouvre le robinet qui fermait la partie inférieure, l'eau coule en vertu de toute la charge, et donne un volume égal à celui

que les formules indiquent. Aucune tranche liquide ne peut se séparer des tranches voisines, et un mouvement commun s'établit.

Une conduite, dont le profil dépasserait sur une partie de sa longueur la limite *dc*, ne doit avoir aucun point haut dans cette partie. On ne pourrait en effet recourir aux ventouses, tubes ouverts ou robinets, pour faire sortir l'air emprisonné dans les tubes, puisque ces appareils n'auraient pour résultat que d'introduire de l'air nouveau dans la conduite. Le profil d'une pareille conduite doit être assujetti à cette condition rigoureuse d'avoir toutes ses pentes se succédant avec le même signe. Et remarquons d'ailleurs, à l'appui de cette observation, que dans une pareille conduite, les parois étant pressées avec un poids inférieur à celui de l'atmosphère, l'air en dissolution dans l'eau se dégagerait avec une facilité plus grande que dans les conduites ordinaires. Sous le rapport hygiénique, ce dégagement d'air est encore chose fâcheuse. On sait que l'eau est beaucoup plus salubre lorsqu'elle tient une certaine quantité d'air en suspension, et qu'on a même recommandé souvent de placer de temps en temps des chutes dans les aqueducs, afin de favoriser l'accroissement du volume d'air que l'eau peut retenir à la pression atmosphérique.

4° *Cas où la pression intérieure peut être nulle ou négative.* — Nous avons vu que, pour une conduite dirigée suivant *mc*, la pression au point *n* était inférieure à la pression atmosphérique d'une quantité mesurée par la hauteur *nf*; si le point *n* s'élève jusqu'à venir en *n'* à une distance telle au-dessus de *cd* que *n'f* représente la pression atmosphérique, la pression sera nulle au point *n'* dans une conduite telle que *mn'c*, le liquide s'écoulera en *n'* en vertu d'une charge égale à la somme de la pression atmosphérique et de la charge due à la différence de niveau entre *a* et *n'*; l'écoulement sera le même que si la conduite était sciée en *n'* et débouchait dans le vide; on aura beau allonger la branche descendante *n'c*, le débit restera invariable. Il en sera de même pour toutes les conduites ayant un de leurs points sur la ligne *oo'* parallèle à *dc* et située au-dessus d'elle à une distance verticale égale à la hauteur de la colonne liquide qui mesure la pression atmosphérique.

Si une conduite avait un de ses points au-dessus de la ligne *oo'*, la pression en ce point deviendrait négative, et en remontant vers le réservoir, on trouverait encore la pression nulle au point où la conduite coupe la ligne *oo'*; l'écoulement serait analogue à celui du cas précédent.

Ces considérations, plus théoriques que pratiques, ont cependant leur intérêt et peuvent trouver leur application notamment dans la question du siphon.

Dans la réalité, l'écoulement ne pourra persister avec une pression nulle ou négative; si l'extrémité *c* de la conduite débouche en plein air, l'air pénètre dans le tuyau et l'écoulement ne se fait plus à pleine section, la conduite se transforme en une sorte de rigole; si l'extrémité de la conduite plonge dans un réservoir, l'air extérieur ne remonte plus dans le tuyau, mais l'air dissous dans l'eau s'en dégage sous l'influence de la diminution de pression, il s'accumule dans la partie haute de la conduite et finit par arrêter l'écoulement.

Résumé. — Voici le résumé de l'étude précédente :

1° Les conduites sur les parois intérieures desquelles s'exercent des pressions plus grandes que l'atmosphère ne sont sujettes à aucun inconvénient; elles peuvent même avoir des points hauts, attendu qu'il est possible de faire dégager l'air retenu dans ces parties.

2° Les conduites à pressions plus petites que l'atmosphère sont sujettes à des intermittences causées par le dégagement de l'air; elles ne coulent qu'à la ma-

nière des siphons et ne peuvent être mises en charge que par le procédé employé pour ces appareils; de plus, dans leur tracé il faut exclure tous les points hauts, puisque ni robinets, ni tuyaux, ni ventouses ne peuvent être appliqués sur leurs parois; enfin le dégagement d'air auquel elles donnent continuellement naissance rend l'eau qu'elles conduisent moins salubre pour les populations qu'elles sont destinées à alimenter.

3° Les conduites à pressions négatives modifient radicalement les conditions de l'écoulement, puisque la pression négative n'arrive que parce que la pose topographique de la conduite met celle-ci dans l'impossibilité de satisfaire aux résultats déduits des formules.

4° Les conduites à pressions égales à l'atmosphère ou à pressions nulles forment la limite : d'une part entre les conduites à pressions plus petites et plus grandes que l'atmosphère ; d'autre part entre les conduites à pressions plus petites que l'atmosphère et à pressions négatives. Elles présentent évidemment elles-mêmes les inconvénients qui s'attachent aux conduites dont elles forment la limite inférieure ; il convient donc, dans tout projet de distribution d'eau, de chercher à établir les conduites de telle façon que leurs parois aient toujours à résister à des pressions plus grandes que l'atmosphère. Dans le cas où l'on serait exposé à rencontrer des pressions inférieures à la pression atmosphérique en quelque point du parcours, il y aura lieu d'examiner s'il ne serait pas possible sur une partie de la longueur de remplacer le tuyau par une rigole découverte.

Influence exercée par l'air confiné sur le débit d'une conduite. — L'influence exercée sur le débit d'une conduite par l'air, qui se dégage de l'eau et qui s'accumule dans les parties hautes du tuyau, a été reconnue depuis longtemps. Couplet l'a constatée sur une conduite amenant l'eau de Roquencourt à Versailles, et voici l'explication qu'en donna l'Académie des sciences :

« M. Couplet a vu qu'en lâchant l'eau à l'embouchure d'une conduite, il se passait près de dix jours avant qu'il en parût une goutte à son bout de sortie. Cet accident, si bizarre en apparence, venait, selon l'explication de M. Couplet, d'un air cantonné dans la partie supérieure de certains coudes de la conduite élevés sur l'horizon. Une eau qui se présentait pour passer tendait à forcer cet air dans son retranchement et à le pousser en avant ; mais une autre eau déjà passée avant que l'air se fût amassé dans le haut du coude le soutenait, et si elle se trouvait être à la même hauteur verticale que celle qui tendait à pousser en avant, il se faisait un équilibre et un repos que l'on voit bien qui pouvait durer longtemps. On remédia à cet inconvénient en adoucissant quelques coudes de la conduite et en mettant aux angles les plus élevés des ventouses où l'air pouvait se retirer sans nuire au cours de l'eau. Après cela, l'eau venait au bout de douze heures, précédée de bouffées de vents, de flocons d'air et d'eau, de filets d'eau interrompus, et tout cela prenait presque la moitié des douze heures d'attente. »

Dans son architecture hydraulique, Belidor démontra la nécessité de placer des ventouses ou des robinets :

1° Pour empêcher la rupture des tuyaux en faisant évacuer l'air qui s'opposait au mouvement du fluide ;

2° Pour permettre au volume débité d'arriver au maximum, ce qui ne pouvait avoir lieu tant qu'il restait de l'air dans les tubes.

Le seul remède que tous les auteurs aient conseillé et que les praticiens aient adopté, pour combattre les effets de l'air emprisonné dans les conduites d'eau, a été de placer, dans les points hauts de ces conduites, des soupapes chargées d'un poids et analogues à celles des chaudières de machines à vapeur, des tuyaux

verticaux implantés sur la conduite et s'élevant à une hauteur suffisante pour qu'il n'y ait pas déversement, des robinets ou des ventouses à flotteurs telles que celles qu'on emploie aujourd'hui dans toutes les distributions d'eau.

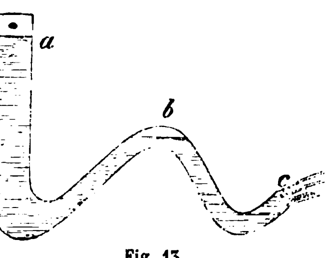


Fig. 13.

Lorsque l'air se loge à la partie haute du tube b et s'y confine en gardant avec l'eau une surface de séparation horizontale, il produit un rétrécissement momentané de section qui entraine une augmentation de vitesse, et par suite une perte de charge quelquefois considérable.

Mais il arrive souvent que l'air confiné occupe un espace analogue à celui que représente la figure 14 ; l'eau venant du réservoir d'alimentation et de la première partie l_0 de la conduite s'épanche au sommet b comme par un déversoir,

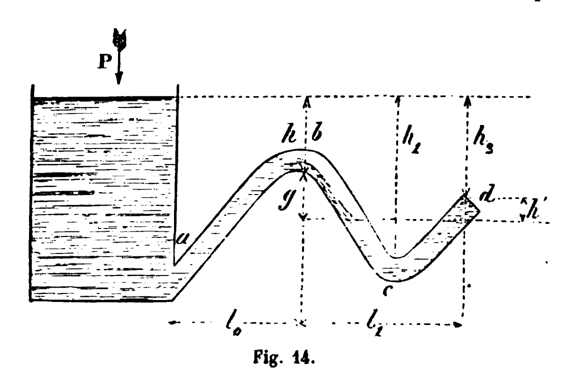


Fig. 14.

s'écoule ensuite pendant quelque temps dans la section descendante comme elle le ferait dans une rigole, et, après un certain temps, finit par remplir de nouveau toute la section du tuyau, de sorte que l'écoulement en d se fait à plein tuyau. La première partie l_0 alimente donc la seconde partie l_1 comme le ferait un réservoir muni d'un déversoir. Nous confondons toujours les longueurs réelles avec leurs projections horizontales.

Désignons par

f	la force élastique de l'air confiné, exprimée en hauteur d'eau,
$h\ h_1\ h_2$	les cotes des points b, c, d,
y	la hauteur de la lame d'eau qui coule en b sur le déversoir,
r et u	le rayon de la conduite et la vitesse de l'eau à pleine section,
g	la hauteur de la bulle d'air,
h'	la différence de niveau entre le pied de la bulle d'air et l'orifice de sortie.

La charge de la première partie l_0 de la conduite est. . . $P+h-y-f$
Et celle de la deuxième partie l_1. . . . . $f-h'-P$.

Appliquant l'équation fondamentale du mouvement de l'eau dans les tuyaux aux deux sections distinctes l_0 et l_1, il vient :

$$P+h-y-f=\frac{l_0}{r}\,b_1u^2 \qquad f-h'-P=\frac{l_1}{r}\,b_1u^2$$

Égalant les deux valeurs de f tirées de ces équations, on trouve :

$$h = h' + y + \frac{l_0 + l_1}{r} b_1 u^2$$

on a d'autre part :

$$h - y + g = h' + h_2$$

Combinant ces deux dernières équations, on arrive à :

$$u = \sqrt{\frac{r}{l_0 + l_1} \frac{1}{b_1}} \sqrt{h_2 - g}$$

et cette relation permet de calculer l'influence exercée par la bulle sur la vitesse d'écoulement.

Le cas le plus intéressant à étudier est celui où le tuyau ne donnerait aucun produit ; c'est qu'alors

$$u = o \quad \text{et} \quad y = o$$

ce qui entraîne

$$h_2 = g \quad \text{et} \quad h = h'$$

ces relations signifient que la hauteur de l'espace occupé par la bulle est égale à la charge sur l'orifice extrême de la conduite.

Dans ce cas, la force élastique f de l'air confiné est égale à $(P + h)$.

Cette force élastique est généralement constante, cependant elle varie avec la température ; elle est plus forte en été qu'en hiver, de sorte que l'écoulement pourra s'arrêter en été et recommencer en hiver.

Telle est l'explication d'un fait singulier d'écoulement qui se présentait en 1750 sur la conduite alimentaire du couvent de Sainte-Marie, faubourg Saint-Jacques, à Paris. Cette conduite fonctionnait bien en hiver, en automne et au printemps, mais s'arrêtait lors des grandes chaleurs de l'été ; Deparcieux, consulté à ce sujet, donna les causes du phénomène.

Dans la partie descriptive des appareils, nous reviendrons sur les systèmes mis en œuvre pour l'évacuation de l'air confiné dans les conduites.

DU SIPHON

Le siphon sert à transvaser un liquide d'un vase dans un autre vase situé à un niveau inférieur ; c'est un appareil en usage dans beaucoup d'industries, il peut trouver son application en grand dans les travaux hydrauliques.

Considérons deux réservoirs A et B réunis par un tube deux fois recourbé à angle droit ; ce tube constitue le siphon ; supposons-le amorcé, c'est-à-dire rempli de liquide ; cette opération sera facile si l'on ménage sur la branche horizontale du siphon un orifice à robinet, par lequel on introduira de l'eau qui prendra la place de l'air, les extrémités des deux tubes plongeant dans les réservoirs étant fermées par des robinets.

Le siphon étant rempli, les deux robinets inférieurs ouverts et le robinet supérieur fermé, qu'arrivera-t-il ? D'abord, il ne se produira point de disjonction entre deux tranches liquides contiguës du siphon, car cela déterminerait un vide local que la pression atmosphérique extérieure tendrait immédiatement à combler (cela suppose que la hauteur h de la petite branche est inférieure à la hauteur d'eau qui mesure la pression atmosphérique. En outre, une tranche liquide de la branche horizontale du siphon est soumise : à droite, à une pression égale à la pression atmosphérique P diminuée de la hauteur h ; à gauche, à une pression égale à la pression atmosphérique P diminuée de la hauteur H ; la tranche considérée est donc poussée de droite à gauche, c'est-à-dire du réservoir supérieur au réservoir inférieur, par une charge égale à la différence $(H-h)$ des hauteurs des deux branches du siphon.

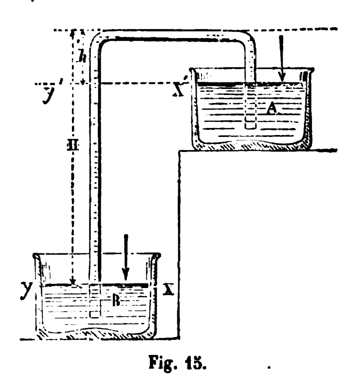


Fig. 15.

Il y aura donc écoulement de A vers B en vertu d'une charge totale $(H-h)$, et la vitesse théorique de l'écoulement sera :

$$v=\sqrt{2g(H-h)}$$

La vitesse pratique dépend de la résistance du tuyau ; si l est le développement total du siphon et r son rayon intérieur, l'équation fondamentale du mouvement dans les tuyaux nous donne :

$$r(H-h)=b_1lu^2.$$

équation d'où on déduira la vitesse moyenne u.

Dégagement de l'air dans le siphon. — La disposition même du siphon nous indique qu'il ne fonctionnera pas si la hauteur h de la petite branche dépasse la pression atmosphérique ; le siphon étant rempli complètement et mis en communication avec les deux réservoirs, l'eau de chaque branche s'écoulera dans le réservoir correspondant, il se formera dans la partie haute du siphon une chambre barométrique ; chaque branche sera transformée en un baromètre à eau.

Le siphon ne peut donc fonctionner que si h est inférieure à la pression atmosphérique, c'est-à-dire à $10^m,33$ lorsqu'il s'agit de l'eau.

Même dans le cas du fonctionnement, la pression au sommet du siphon est toujours inférieure à la pression atmosphérique d'une quantité mesurée par la hauteur de la petite branche. L'air dissous dans l'eau se dégage donc, s'accumule à la partie haute et ne tarde pas à arrêter l'écoulement.

C'est là l'inconvénient du siphon employé comme appareil d'épuisements : nous avons eu l'occasion d'installer dans une galerie de mine percée à flanc de coteau un siphon formé de tuyaux en tôle bitumée ; lorsqu'il était amorcé, il fonctionnait bien pendant quelque temps, puis s'arrêtait, de sorte qu'on n'en tira point tout l'avantage qu'on s'en promettait. Il aurait fallu placer au sommet du siphon une petite pompe à air, mise en mouvement par un enfant ou par une

transmission prise sur une machine motrice ; avec cette addition, le siphon deviendrait un appareil d'épuisement commode et économique.

Siphon renversé. Conduite forcée. — Autrefois, lorsqu'une conduite d'eau avait à franchir une vallée ou une route, on construisait à grands frais des ponts aqueducs monumentaux; aujourd'hui, on les évite autant que possible et on les remplace par des conduites forcées ou siphons renversés.

Soit un canal amenant ses eaux en A avec une vitesse v, il faut faire passer ces

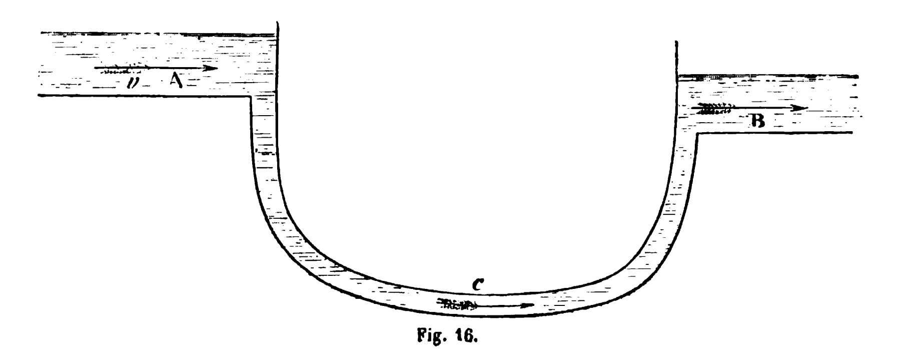


Fig. 16.

eaux de l'autre côté d'une vallée en B où recommence une nouvelle section du canal ; on se sert à cet effet d'une conduite cylindrique en fonte C de longueur l dans laquelle le liquide prend une vitesse u.

Nous admettons qu'à cause des changements brusques de direction, la vitesse v est complétement détruite en A et la vitesse u complétement détruite en B par suite des remous; il en résulte une perte de charge

$$\frac{v^2}{2g}+\frac{u^2}{2g};$$

d'autre part, le frottement dans la conduite C absorbe une charge égale à

$$\frac{b_1 l u^2}{r}$$

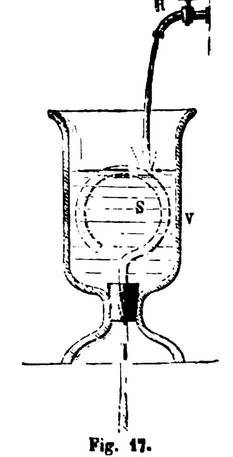


Fig. 17.

On peut donc calculer la perte de charge totale de A en B et par suite l'abaissement que doit éprouver le plafond du canal lorsqu'on passe d'un de ces points à l'autre.

On peut diminuer sensiblement les pertes de charge en terminant la conduite C par des raccords tangentiels de manière que ses orifices d'entrée et de sortie se trouvent dans la direction même du canal. On doit réaliser cette disposition toutes les fois qu'elle est possible.

Écoulement intermittent par siphon. — Le siphon donne lieu à des phénomènes d'écoulement intermittent qui permettent d'expliquer le mécanisme de certaines sources ou fontaines intermittentes que l'on rencontre dans la nature.

Dans un vase V est un siphon S courbé en cercle presque complet et traver-

sant le fond du vase; l'eau arrive par un robinet R dont le débit est moindre que celui du siphon lorsqu'il fonctionne. Le vase se remplissant peu à peu, l'eau finit par dépasser le sommet du siphon, celui-ci se trouve amorcé, il fonctionne et ne tarde pas à vider le vase; puis, quand son orifice d'entrée n'est plus noyé, l'écoulement s'arrête jusqu'à ce que le vase se soit rempli de nouveau jusqu'au sommet du siphon. Et ainsi de suite, de sorte qu'on réalise bien un écoulement intermittent.

CHAPITRE II

QUANTITÉ ET QUALITÉ DES EAUX

QUANTITÉ D'EAU A DISTRIBUER DANS UNE VILLE

La première question à résoudre lorsqu'on prépare un projet de distribution d'eau dans une ville est de savoir quelle quantité d'eau on doit amener pour satisfaire à tous les besoins de la consommation.

Il est impossible de faire une réponse précise à cette question :

On peut dire que la quantité d'eau n'est jamais trop considérable, et qu'il faut en amener le plus possible, lorsqu'on peut le faire sans grande augmentation de frais. Cependant, on est limité soit par le débit des sources d'alimentation dont on dispose, soit par la dépense. Lorsque les sources d'alimentation n'ont pas toute la puissance désirable, il faut bien se contenter de ce que l'on a et une distribution d'eau, même insuffisante, réalisera toujours une amélioration sensible dans la salubrité d'une ville et dans le bien-être de ses habitants. Lorsqu'on est limité dans la dépense, on s'attache à obtenir le minimum du volume nécessaire à tous les services.

L'expérience de ce qui a été déjà fait est un guide utile en ces matières.

« La quantité d'eau nécessaire à l'ensemble des besoins d'une ville, dit M. de Freycinet dans ses *principes de l'assainissement des villes*, varie, pour un même chiffre d'habitants, avec une foule de circonstances locales, le climat, les habitudes, le nombre d'établissements industriels, et surtout avec la superficie relative de la ville ou ce qu'on nomme la densité moyenne de la population. Il est évident, en effet, que dans les villes où la population est clair-semée et où par conséquent les surfaces à entretenir (rues, squares, parcs, jardins, cours...) sont très-étendues par rapport au nombre des habitants, la consommation d'eau est beaucoup plus considérable que dans les villes où cette population est contenue dans des espaces resserrés. On ne peut donc pas assigner un chiffre fixe pour l'approvisionnement d'eau nécessaire à chaque habitant. Il ne peut d'ailleurs être question que d'une limite inférieure, car on ne saurait jamais dire qu'il y ait trop d'eau dans une ville.

On admet qu'avec les habitudes de propreté et de confort qui se sont créées dans les cités modernes, la consommation par tête d'habitant ne doit pas descendre au-dessous de 100 litres d'eau par jour, mais qu'à ce taux les vrais besoins de l'assainissement peuvent être satisfaits. Mais si l'on veut en outre pourvoir à l'agrément et à l'élégance, rafraîchir fréquemment la voie publique, arro-

ser les plantations et les jardins, entretenir des fontaines jaillissantes, la consommation s'élève beaucoup au dessus de ce chiffre et n'a pour ainsi dire plus de limites. D'ailleurs, il faut tenir compte de l'accroissement probable de la population et même faire la part, dans une certaine mesure, des besoins nouveaux qui pourraient se faire jour avec le progrès des mœurs ou de l'industrie. On est donc généralement conduit à adopter un chiffre fort supérieur à celui de 100 litres, surtout quand les circonstances sont favorables, en ce sens que la dépense à faire n'augmente pas beaucoup avec ce chiffre. C'est ainsi qu'on voit des villes pourvues de 300 et 400 litres par tête et que la Rome ancienne qui, à la vérité, se donnait le luxe, inconnu de nos jours, de faire voguer des galères en pleine place publique, jouissait de plusieurs milliers de litres par habitant. »

Rome reçoit encore aujourd'hui 200,000 mètres cubes d'eau par jour pour une population qui ne dépasse guère 200,000 habitants. Au premier siècle de notre ère, neuf aqueducs amenaient sur les sept collines 1,500,000 mètres cubes par jour, soit à peu près le volume que la Marne verse dans la Seine en temps ordinaire.

D'après Darcy, la dépense par tête se compose de deux termes :

1° Pour les usages domestiques, les arrosements de jardin, les bains, les établissements industriels, les incendies, les fontaines monumentales.	90 litres.
2° Pour les bornes-fontaines et l'arrosage des voies publiques . .	60 —
Total par tête d'habitant.	150 litres.

On compte qu'un homme absorbe par jour 2 litres d'eau pour son alimentation et 18 litres pour l'usage extérieur. Chaque habitant d'une maison est donc censé consommer 20 litres d'eau par jour lorsqu'on lui fournit cette eau à discrétion.

A Paris, on adopte pour les abonnements les bases suivantes :

Par personne et par jour.	20 litres.
Par cheval.	75
Par voiture de luxe à deux roues.	40
Par voiture de luxe à quatre roues	75
Par mètre carré de jardin, 500 litres par an et par jour.	1,50
Par force de cheval d'une machine à haute pression. . . .	1,50
— — à détente et condensation.	10
= — à basse pression. . . .	20
Par bain.	300
Par litre de bière faite.	4

Chaque arrosage de la voie publique consomme environ 1 litre par mètre carré; dans les grandes chaleurs, on fait à Paris trois arrosages par jour, ce qui consomme 3 litres par mètre carré de chaussée.

Une borne-fontaine, placée au sommet des pentes, consomme pour le lavage des ruisseaux 6 à 10 mètres cubes par jour.

Quant aux eaux jaillissantes, voici, d'après Dupuit, le débit de quelques fontaines monumentales de Paris :

Gerbe du Palais Royal.	23	litres par seconde.
Place Saint-Georges.	1	—
Place Richelieu.	9	—
Chaque fontaine de la place de la Concorde.	55	—
Gerbe du rond-point des Champs-Élysées.	25	—

La consommation pour les besoins extérieurs de propreté est d'autant plus forte par habitant que l'on peut se procurer de l'eau avec plus de facilité ; ainsi, lorsqu'il existe des robinets dans les cours, la consommation par tête sera plus forte dans une maison à un seul étage que dans une haute maison à six étages.

Ce fait nous enseigne que ce serait un acte de saine philanthropie que de mettre l'eau à la portée immédiate de tous les consommateurs ; les exigences financières des compagnies ne permettent point toujours de le faire. Aussi l'intervention des compagnies doit-elle être rejetée en matière de distribution d'eau ; c'est aux villes à se charger elles-mêmes de l'exploitation des eaux et à s'imposer des sacrifices pour satisfaire à des besoins d'une importance capitale.

« Il faut éviter, dit Dupuit, les erreurs qui résultent de l'abus qu'on fait trop souvent de l'introduction dans les calculs de quantités moyennes, soit pour la consommation, soit pour l'alimentation. La consommation d'eau est très-variable suivant les saisons. Si une ville consomme 200 litres en moyenne, il est très-possible que la consommation pendant les grandes chaleurs s'élève à 250 et même à 300 litres, tandis qu'elle tombera à 150 et même à 100 pendant l'hiver et les jours pluvieux. Si donc l'alimentation se fait par une machine à vapeur, il faudra qu'elle soit capable d'élever 300 litres en vingt-quatre heures, mais l'excédant de charbon brûlé pendant certains jours sera compensé par la diminution qui aura lieu dans d'autres, et pourra se calculer sur 200 litres. Si l'alimentation se fait au moyen de sources amenées par des aqueducs, il faudra que le minimum du produit des sources soit suffisant pour le maximum de consommation. » Si les sources sont irrégulières, on devra parer à leurs défaillances par des machines élévatoires fonctionnant d'une manière intermittente.

En 1854, la ville de Paris avait à sa disposition l'eau de l'Ourcq et l'eau d'Arcueil, l'eau de Seine élevée par machines à vapeur, l'eau du puits de Grenelle, l'eau de Belleville et des prés Saint-Gervais, en tout 147,800 mètres cubes par jour, soit, pour 2 millions d'habitants, environ 75 litres par jour.

Aujourd'hui elle possède, outre les eaux précédentes, celles qui proviennent de la Marne, de divers puits artésiens, de la Dhuis et de la Vanne, en tout plus de 400,000 mètres cubes par jour, soit 200 litres par habitant.

Peut-être, dans un avenir prochain, faudra-t-il songer à augmenter encore cette proportion, et recourir pour les services publics à une distribution spéciale d'eau de Seine.

« On est frappé, dit M. l'ingénieur Huet, du développement que prennent les besoins d'eau dans une ville d'autant qu'ils sont mieux satisfaits, lorsqu'on considère les résultats d'une expérience récente. On parlait généralement, il y a peu d'années encore, de 200 litres d'eau en moyenne, par jour et par habitant, comme d'une quantité *maxima* avec laquelle on devait pourvoir à tous les besoins.

C'est en Amérique, où les nécessités du bien-être matériel ont pénétré dans les masses et où les moyens d'y satisfaire ont appelé promptement l'attention des administrations locales, que l'insuffisance de cette quantité d'eau a d'abord été constatée. Dès 1851, la consommation moyenne s'élevait, l'été, à Philadelphie, à 250 litres environ par habitant; à New-York, on constatait, en 1873, pendant les grandes chaleurs, une consommation, les samedis, de plus de 400 litres par habitant.

« Si nous venons en Europe, et que nous considérions les villes le plus abondamment pourvues, nous voyons Glascow qui, en 1854, absorbe complétement sa dotation provisoire de 200 litres par habitant, en en consacrant 162 exclusi-

rement à ses usages domestiques, 38 litres restant, non pas seulement pour le service public, mais encore pour ses fabriques et ses besoins industriels. Une pareille répartition paraît anormale en France, où la consommation des services publics, de l'arrosage des rues, du lavage des ruisseaux, des fontaines monumentales, etc., est toujours bien supérieure à celle du service privé. En Angleterre, au contraire, elle est générale ; à Londres, où la consommation est aujourd'hui de 136 litres environ par habitant, on ne compte qu'une fontaine monumentale, et le service public de l'arrosage des rues et du lavage des ruisseaux n'existe pour ainsi dire pas ; l'eau y est presque exclusivement consacrée aux usages domestiques. Lorsque le service public aura pris, dans les villes d'Angleterre, le développement qu'il a dans les principales villes de France, et que, en France, les besoins domestiques seront devenus ce qu'ils sont en Angleterre ou en Amérique, la consommation s'élèvera facilement, de part et d'autre, à 300 ou 400 litres par habitant. »

Nous avons trouvé dans divers documents des renseignements sur le volume d'eau distribué par jour et par habitant dans diverses villes, et nous les avons réunis dans le tableau suivant :

QUANTITÉS D'EAU PAR JOUR ET PAR HABITANT.

Angoulême	35 à 40	litres.	Manchester	190	litres.
Besançon	246	—	Marseille	85	—
Bordeaux	170	—	Metz	470	—
Bruxelles	80	—	Montpellier	20 à 25	—
Cette	106	—	Munich	50 à 60	—
Clermont	50 à 55	—	Nantes	80	—
Constantinople	20	—	Narbonne	62 à 78	—
Dijon	198 à 678	—	Paris	20	—
Édimbourg	50	—	Rome	1100	—
Saint-Étienne	170	—	Toulouse	62 à 78	—
Gênes	120	—	Madrid	100	—
Glascow	560	—	Boston	390	—
Grenoble	60 à 65	—	New-York	200	—
Hambourg	125	—	Brooklyn	63	—
Le Havre	40 à 65	—	Chicago	168	—
Londres	136	—	Jersey City	258	—
Lyon	100	—	Philadelphie	139	—

QUALITÉS DES EAUX

L'eau pure est formée de la combinaison de deux gaz, l'oxygène et l'hydrogène, dans la proportion de 1 volume du premier pour 2 du second, ou de 8 parties en poids du premier pour 1 du second.

Le composé chimique ainsi défini ne se rencontre pas dans la nature. La grande masse liquide qui forme les mers est un foyer d'évaporation continuelle, et les vapeurs, entraînées par les vents, engendrent les nuages qui se résolvent en pluie. La pluie dissout les gaz de l'atmosphère et, tombée sur le sol, soit qu'elle glisse à la surface, soit qu'elle pénètre dans les profondeurs, elle rencontre une infinité de sels et de substances plus ou moins solubles dont elle se charge.

On conçoit donc que la nature de l'eau est des plus variables et des plus complexes, et dépend essentiellement de sa provenance.

On distingue trois espèces d'eau principales : 1° l'eau de pluie; 2° l'eau de rivière; 3° l'eau de sources. Nous allons en rappeler sommairement la composition et les qualités.

1° *Eau de pluie.* — L'eau de pluie renferme surtout des principes gazeux : l'acide carbonique, l'ammoniaque et les acides oxygénés de l'azote (produits probablement par les phénomènes électriques de l'atmosphère), quelquefois un peu d'acide sulfureux et d'hydrogène sulfuré (au voisinage des villes et des grandes usines), et enfin des sels entraînés avec l'eau de mer, tels que les chlorures et sulfates de soude, de magnésie et de chaux. C'est le chlorure de sodium qui domine, et sa proportion varie en général de 2 à 4 grammes par mètre cube d'eau.

Aux principes minéraux s'ajoutent souvent des particules organiques entraînées par les vents à des distances considérables.

La somme des matières solides contenues dans un mètre cube d'eau de pluie dépasse rarement 50 grammes, et n'est guère en moyenne que de 30 grammes.

2° *Eau de rivière.* — L'eau qui tombe sur le sol agit sur les formations géologiques qu'elle rencontre; elle dissout certaines substances, elle en attaque d'autres chimiquement, grâce à l'acide carbonique et à l'ammoniaque qu'elle renferme, enfin elle exerce une action mécanique plus ou moins énergique qui se traduit par un broyage et une pulvérisation des roches de toute nature. Les débris sont entraînés par les eaux et se déposent à mesure que la vitesse du courant diminue; les plus gros tombent d'abord, et les particules vaseuses restent en suspension, même au milieu d'eaux animées de très-faibles vitesses.

La composition de l'eau de rivière varie donc suivant les époques, suivant la constitution géologique, la pente et la forme du lit.

Les matières solides maintenues en suspension sont quelquefois en quantités considérables. Ainsi le Nil contient 1,500 grammes de matières en suspension par mètre cube, le Gange de 200 à 300 grammes suivant les saisons, le Rhin de 20 à 200 grammes. Les matières en suspension, à moins qu'elles ne soient à l'état de vase absolument impalpable, ne sont pas d'un grand inconvénient pour les machines à vapeur, car il suffit de faire passer les eaux dans des bassins où elles se déposent.

La quantité de matière solide dissoute est beaucoup plus considérable dans l'eau de rivière que dans l'eau de pluie. Ainsi la Meuse abandonne à l'évaporation 125 grammes de matière solide par mètre cube, la Loire et la Garonne 135 grammes, le Rhône 182 grammes, le Rhin 150 à 300 grammes, la Marne 500 grammes, le canal de l'Ourcq 1 kilogramme, la Seine de 190 à 430 grammes.

La proportion des matières solides dissoutes va généralement en augmentant à mesure qu'on s'éloigne de la source.

C'est le carbonate de chaux qui domine parmi ces matières. Dans la Loire, il constitue 53 p. 100 du résidu, dans la Tamise 50, dans le Danube 60, dans la Seine 75 et dans le Rhin 85.

Outre les sels minéraux que l'on trouve dans les eaux de pluie, les eaux de rivière entraînent surtout du carbonate de chaux, du sulfate de chaux, des sels de magnésie et des sels alcalins, de l'alumine et de l'oxyde de fer, quelquefois de la silice en proportion notable, rarement des azotates et des phosphates.

A tout cela il faut joindre, notamment à l'aval des grandes villes, une proportion plus ou moins forte de matières organiques, qui rendent les eaux impropres à l'alimentation. Nous ne parlerons pas non plus des gaz en dissolution

qui peuvent varier, dans la Seine, de 30 à 35 centimètres cubes par litre d'eau.

Des eaux de rivière il faut rapprocher les eaux des lacs, qui renferment les éléments de l'eau de pluie, plus les substances empruntées à leur propre cuvette. Dans les montagnes granitiques, l'eau des lacs sera riche en sels alcalins; dans les pays calcaires, elle renferme une grande proportion de sels de chaux; dans certaines régions volcaniques, les lacs sont chargés de bitumes et de goudrons, telles sont la mer Morte et la mer Caspienne.

3° *Eau de source et de puits.* — On peut admettre approximativement que les trois dixièmes seulement de l'eau de pluie s'écoulent à la surface du sol; le reste pénètre dans ses profondeurs, jusqu'à ce qu'il rencontre une cuvette imperméable dont il gagne la partie la plus basse. Les sources abondantes se trouvent donc à des profondeurs variables suivant les pays, et nous avons vu des puits artésiens descendre jusqu'à 800 et 900 mètres au-dessous du sol.

Les eaux, qui pénètrent ainsi dans la terre, se trouvent filtrées et prennent une limpidité bien supérieure à celle des rivières; mais, de cette limpidité, il faut bien se garder de conclure la pureté chimique.

En effet, l'eau s'échauffe rapidement à mesure qu'elle pénètre dans le sol; elle dissout quelquefois de grandes quantités de gaz carbonique et sulfhydrique; dans ces conditions, elle devient apte à dissoudre des proportions considérables de sels minéraux, qu'elle contient encore au moment où elle reparaît à la surface du sol. L'eau de source est donc généralement impure, et les impuretés ne s'y trouvent pas en suspension, mais seulement en dissolution.

Voici les résultats déduits de nombreuses analyses chimiques:

Le résidu solide après dessiccation est compris d'ordinaire entre 20 et 1,250 grammes par mètre cube; exceptionnellement, il dépasse ce dernier chiffre et peut atteindre plusieurs kilogrammes par mètre cube.

La majeure partie se compose de carbonates: on en trouve d'ordinaire de 6 à 600 grammes par mètre cube; exceptionnellement, jusqu'à 1,500 grammes.

Les chlorures entrent	pour 2 à 500	grammes	par mètre cube.
Et les sulfates —	pour 1 à 1250	—	—

Les trois genres de sels existent toujours; la silice fait quelquefois défaut, on en trouve dans certaines eaux dans la proportion de 1 à 400 grammes.

Les phosphates et azotates manquent la moitié du temps et n'entrent que dans de faibles proportions.

On trouve presque toujours un peu d'alumine et d'oxyde de fer dans des proportions variables ainsi qu'un peu de matières organiques.

On voit qu'en somme nous ne pouvons rien dire de précis; dans chaque cas, on se rendra compte par une expérience directe de la composition de l'eau qu'on se proposera d'employer.

Analyse d'une eau. — La connaissance du résidu solide est la chose la plus intéressante à tous égards; la méthode la plus simple d'analyse consistera donc à évaporer dans une bassine un poids connu d'eau et à recueillir le résidu solide qu'on analysera comme nous avons expliqué que l'on faisait pour une pierre calcaire. Ce qu'il importe de déterminer avec précision, ce sont les proportions de carbonate et de sulfate de chaux, ainsi que la silice, si elle existe en grande quantité.

On peut, au préalable, se rendre un compte approximatif des substances étrangères contenues dans l'eau. Ainsi :

1° L'oxalate d'ammoniaque donne un précipité blanc d'oxalate de chaux tant qu'il reste un sel de chaux dans la liqueur ;

2° Le sulfhydrate d'ammoniaque précipite tous les sels métalliques à l'état de sulfures ;

3° L'azotate de baryte indique la moindre trace d'acide sulfurique ou de sulfate soluble ; il se forme en effet un précipité blanc caractéristique de sulfate de baryte ;

4° De même l'azotate d'argent indique la moindre trace de chlorure ; il se forme un précipité blanc, semblable au lait caillé, qui noircit à la longue.

5° En présence des matières organiques, le chlorure d'or est décomposé et l'or se précipite en poudre noire impalpable.

6° La teinture alcoolique de bois de campêche du jaune passe au violet en présence de l'ammoniaque ou du carbonate d'ammoniaque.

Ce sont les sels calcaires qui communiquent aux eaux les plus fâcheuses propriétés, et qui constituent ce qu'on appelle les eaux crues, impropres à l'alimentation des machines à vapeur et aux usages domestiques.

Le plus nuisible est le sulfate de chaux qu'on trouve dans les eaux de puits de Paris, connues sous le nom d'eaux séléniteuses. Avec le savon ordinaire, le sulfate de chaux donne un savon calcaire insoluble, qui se précipite sur le linge en entraînant avec lui toutes les impuretés ; on n'arrive de la sorte qu'à nettoyer imparfaitement le linge, malgré une consommation de savon très-considérable.

Les légumes renferment un principe qui se combine à la chaux, pour former un composé solide, de sorte que les légumes, cuits dans une eau calcaire ou séléniteuse, durcissent de plus en plus au lieu de s'amollir.

Hydrotimétrie. — L'hydrotimétrie est la mesure de la crudité de l'eau. En voici le principe : la dissolution alcoolique de savon produit dans une eau non chargée de sels terreux (calcaires ou magnésiens) une mousse persistante à la surface ; au contraire, s'il y a dans l'eau des sels terreux, la mousse ne se produit pas et il se forme des grumeaux insolubles qui sont des savons calcaires.

On prépare une dissolution titrée de savon, c'est-à-dire que l'on dissout un poids connu de savon dans un volume connu d'alcool à un certain degré. La dissolution faite, on la met dans une burette graduée, et, grâce aux données précédentes, on sait combien une division de la burette contient de savon. On verse goutte à goutte la dissolution de savon dans l'eau qu'on veut essayer, et l'on agite après avoir versé chaque goutte ; tant qu'il ne se produit pas une mousse persistante, c'est qu'il reste encore des sels terreux dans la liqueur ; aussitôt qu'on reconnaît l'existence de la mousse persistante, l'opération est terminée ; on lit alors sur la burette combien de divisions de la dissolution on a employées, et, s'il y en a par exemple 17, on dit que l'eau marque 17°, à l'hydrotimètre considéré. Si partout on emploie le même hydrotimètre, la même dissolution de savon, il est clair que tous les résultats sont comparables, et que l'on a de la sorte des renseignements précieux sur la crudité relative des eaux employées.

En somme, ce procédé ne donne que des indications approchées ; dans des dissolutions qui ne renfermeraient que des sels neutres de chaux, on pourrait de la sorte calculer exactement la proportion de ces sels ; mais les sels de magnésie décomposent aussi le savon, de même l'acide carbonique ; à ce sujet il faut remarquer que la mousse persistante ne tarde pas elle-même à disparaître,

parce que l'acide carbonique de l'air la décompose. Les matières organiques modifient aussi les résultats.

Toutefois, l'hydrotimètre donne des renseignements fort utiles et très-précieux dans la pratique. Le degré de crudité usité en Angleterre (degré de Hardness) correspond à peu près à 0gr,0142 de carbonate de chaux par litre d'eau; le degré français correspond à 0gr,01 de carbonate de chaux par litre; ainsi une eau qui marque 20° à l'hydrotimètre renferme théoriquement 0gr,20 de calcaire par litre.

Voici quelques renseignements donnés par M. l'inspecteur général Belgrand :

Sources	du granit du Morvan	2° à 11°	à l'hydrotimètre.
—	des sables de la craie inférieure	7° à 12°	—
—	des sables de Fontainebleau	6° à 22°	—
—	de la craie blanche	12° à 17°	—
—	des calcaires de la Beauce	17° à 25°	—
—	Du niveau des marnes vertes et des marnes du gypse (eaux séléniteuses)	23° à 155°	—

CARACTÈRES DES EAUX POTABLES

Une eau potable est celle qui convient à tous les usages domestiques, qui est limpide, fraîche, agréable au goût, facile à digérer.

L'eau, introduite dans l'organisme, ne lui apporte pas seulement le principe aqueux, composé d'hydrogène et d'oxygène, principe indispensable aux réactions chimiques de la nutrition; elle lui apporte encore des sels minéraux en dissolution, tels que le carbonate de chaux ou alcalin, nécessaire à la formation de la charpente osseuse des animaux.

En dehors de cette composition chimique, il faut que l'eau soit agréable au goût; sans doute, une eau peut être saine pour l'alimentation, sans cependant être agréable au goût, et cette question du goût est un peu secondaire, elle dépend de l'habitude et de l'éducation des organes. Nous voyons souvent les animaux boire, sans en être incommodés, des eaux de mare sales et chargées de matières organiques, dont nous ne voudrions certainement pas.

La limpidité est une qualité indispensable à l'eau potable; l'eau trouble ou louche nous inspire toujours une certaine répugnance, et, lorsqu'on s'en sert comme boisson, on la débarrasse des matières en suspension par un filtrage préalable. Les eaux troubles ont en outre l'inconvénient d'introduire dans l'organisme des matières inertes, quelquefois même nuisibles.

La température d'une eau exerce une grande influence sur sa valeur alimentaire; l'eau chaude, d'une température supérieure à celle du sang, agit comme vomitif; de même l'eau tiède, c'est-à-dire celle qui possède une température peu inférieure à celle du corps. L'eau la plus agréable et la plus saine est celle qui possède une température moyenne, 6° à 14° sous notre climat; il est clair que la fraîcheur est une question relative; dans les pays chauds, une eau pourra paraître fraîche que l'on trouverait chaude sous une latitude plus élevée. L'eau froide, dont la température est voisine de zéro, donne une sensation momentanée plus agréable, mais paraît rendre la digestion un peu plus difficile.

L'eau distillée, c'est-à-dire dépouillée des gaz qu'elle tenait en dissolution, est lourde à digérer et répugnante. De même, mais dans une moindre proportion, l'eau stagnante, exposée depuis longtemps à l'air; pour être légère, une eau demande à être bien aérée. L'eau potable doit donc renfermer les deux éléments gazeux de l'atmosphère, l'oxygène et l'azote; si elle renferme une proportion notable d'acide carbonique, elle n'en sera que plus agréable à boire; elle se rapprochera des boissons gazeuses. L'eau distillée, exposée à l'air, ne reprend que lentement ses principes gazeux; pour l'aérer convenablement, il faut l'agiter au moyen de roues à palettes ou y projeter de l'air comprimé. C'est ce qu'on fait sur les navires pour l'eau provenant de la distillation de l'eau de mer; cette eau, sortant de l'alambic, a toujours une odeur nauséabonde, due à la décomposition des matières animales que l'eau de mer tenait en suspension, et il est nécessaire de la purifier par un filtrage au noir animal.

Dans l'économie domestique, on distingue les eaux dures ou crues des eaux douces. Les premières ne dissolvent pas le savon, elles sont impropres, ainsi que nous l'avons expliqué déjà, au blanchissage du linge et à la cuisson des légumes; elles contiennent une grande quantité de chaux, qui se combine à la légumine des végétaux pour donner un sel insoluble, ou qui décompose le savon pour se combiner à l'acide gras et former un nouveau savon insoluble; ce savon insoluble se précipite sur le linge et entraîne toutes les impuretés, de sorte que, non-seulement on consomme beaucoup plus de savon qu'avec de l'eau douce, mais encore on obtient du linge d'une blancheur douteuse. Il paraît que l'influence de l'eau dure est très-sensible dans la préparation du thé; elle exige pour donner une infusion d'égale force, beaucoup plus de feuilles qu'il n'en faudrait avec de l'eau douce et beaucoup plus de temps. L'influence de l'eau est très-grande sur la consommation de savon; une eau bien chargée de calcaire peut consommer trois fois plus de savon que l'eau de pluie, qui est le type de l'eau douce.

La dureté de l'eau tient à la présence de la chaux, qu'elle soit à l'état de sulfate ou de carbonate; la magnésie agit comme la chaux.

L'ébullition amène la séparation d'une partie des sels calcaires qui se précipitent; elle a donc pour effet d'adoucir l'eau.

La dureté tient à une forte proportion de calcaire, qui ne peut se maintenir en dissolution qu'à l'état de bicarbonate, c'est-à-dire avec un excès d'acide carbonique; si on ajoute de la chaux à l'eau dure, le bicarbonate est réduit, il n'y a plus que du carbonate simple que l'eau ne peut maintenir tout entier en dissolution et qui se précipite en grande partie. En ajoutant à de l'eau crue un lait de chaux, on peut donc la rendre beaucoup plus douce. L'agitation suffit à chasser l'excès d'acide carbonique et à précipiter le carbonate, comme on le voit quelquefois sur les roues de moulins; il en est de même du filtrage, l'excès de calcaire reste dans le filtre.

Ce procédé est évidemment inapplicable aux eaux séléniteuses, c'est-à-dire chargées de sulfate de chaux.

Une eau potable ne doit pas être dure, car alors elle est difficile à digérer et peu agréable au goût; elle ne doit pas non plus être trop douce, car elle ne fournirait plus au corps les éléments minéraux qui lui sont nécessaires. Cependant cet inconvénient est bien moindre que la dureté, car les éléments minéraux peuvent être introduits par les autres aliments.

Suivant quelques chimistes, pour être potable, il ne faut pas que l'eau renferme plus de $0^{gr},5$ de résidu solide par litre.

D'après M. Belgrand, elle ne doit pas marquer plus de 20° à l'hydrotimètre, ce qui correspond à 20 centigrammes de carbonate de chaux par litre.

Les sels alcalins, chlorures et azotates, sont nuisibles lorsqu'ils entrent dans l'eau en proportion notable; ils ont une saveur désagréable. Ainsi, lorsque la proportion de chlorure dépasse 1 pour 100, l'eau commence à brûler le palais, elle ne désaltère pas et se rapproche de l'eau de mer; ce sont en effet les sels alcalins qui s'opposent à ce que notre estomac puisse supporter l'eau de mer. Les sels de magnésie ont une saveur métallique fort désagréable; les azotates alcalins produisent un effet analogue et sont préjudiciables à la santé.

On a prétendu que la présence de l'iode était nécessaire pour rendre une eau potable; on a prétendu que le goître des Alpes et de l'Isère tenait à l'absence de l'iode dans l'eau d'alimentation, ou à la présence de la magnésie en quantité exceptionnelle. Ces assertions ne paraissent pas justifiées et la présence du goître semble bien plutôt tenir à un ensemble de causes.

Beaucoup d'eaux renferment des matières organiques; en petite quantité, elles n'empêchent point l'eau d'être potable, mais elles ne lui sont pas nécessaires. En quantité notable, elles communiquent à l'eau une saveur désagréable, elles lui donnent un goût. Une eau, chargée de matières organiques, qui reste en repos à une température douce, entre en putréfaction par la fermentation de ces matières; elle dégage une odeur infecte, les sulfates sont transformés en sulfures; il s'y développe des végétations et des infusoires; l'eau n'est plus potable. L'eau, qui coule avec une certaine rapidité, ne se putréfie pas.

Résumé des qualités d'une eau potable. — Pour résumer les qualités d'une eau potable, nous empruntons à M. Belgrand les quelques lignes suivantes :

Le service d'une ville doit être fait dans des conditions telles, que la population consomme l'eau qui lui est distribuée dans l'état où elle sort des fontaines publiques.

L'eau des conduites publiques doit donc être potable sans aucune préparation, c'est-à-dire être fraîche, limpide, sans odeur ni saveur, sans mélanges répugnants, en un mot être agréable à boire. Il faut surtout qu'elle soit salubre et propre à tous les usages domestiques, notamment qu'elle cuise les légumes, et dissolve le savon; la sécurité de la distribution exige aussi qu'elle ne forme point de dépôts calcaires dans les conduites et n'y développe pas de tubercules ferrugineux.

L'eau peut être considérée comme salubre lorsque les populations qui en font usage depuis longtemps sont saines, vigoureuses et sans maladies spéciales.

L'eau est limpide lorsqu'elle laisse voir distinctement les objets dans des profondeurs de trois à quatre mètres.

On ne connaît pas bien dans quelles conditions se développent les tubercules ferrugineux, qui obstruent si vite les conduites; on voit seulement qu'ils croissent rapidement dans certaines eaux chimiquement pures, comme celles du granite, surtout lorsqu'elles sont limpides.

Du choix à faire entre les eaux de sources et les eaux de rivières. — Lorsqu'il s'est agi d'arrêter définitivement, il y a quelques années, le système de distribution d'eau de Paris, la question s'est posée du choix à faire entre deux systèmes radicalement opposés : 1° amener à Paris les eaux de certaines sources reconnues parfaitement potables, 2° ou bien élever par des machines les eaux de la Seine jusqu'à des réservoirs disposés sur les hauteurs de la ville. Ce sont les dérivations des sources qui l'ont emporté.

Monsieur Aristide Dumont s'est montré dans plusieurs ouvrages le champion des machines élévatoires, et il met en avant les raisons suivantes :

Avec les dérivations presque terminées aujourd'hui, on n'arrive à donner que 200 litres d'eau par habitant; c'est une quantité beaucoup trop faible, car les besoins vont se développer rapidement et il faudra chercher à grands frais de nouvelles sources lorsque l'adjonction d'une machine conduirait au même résultat ; il faut, suivant lui, prévoir que dans l'avenir on devra satisfaire à une consommation égale à celle de l'ancienne Rome, c'est-à-dire un mètre cube par habitant et par jour ; seule, la Seine est capable de fournir un pareil débit.

Le produit des sources est nécessairement variable, il se réduit souvent au tiers et même au dixième de son volume normal; il faut donc s'attendre, dit M. Dumont, à des déceptions inévitables. Les sources baissent toujours en été, c'est-à-dire à l'époque où les besoins augmentent.

Les aqueducs des longues dérivations entraînent des dépenses considérables qui peuvent n'être pas en rapport avec les résultats obtenus, tandis qu'avec les machines on recueille toujours un résultat proportionnel à la dépense qu'on a faite.

Monsieur Belgrand fait valoir comme il suit les raisons qui militent en faveur des dérivations des sources :

Les eaux des grandes rivières ne sont généralement pas incrustantes et ne développent point la formation des tubercules ferrugineux dans les conduites ; c'est donc un avantage qu'elles présentent sur la généralité des eaux de sources ;

Les eaux de rivières ne sont ni malsaines, ni désagréables, lorsqu'elles ne sont point souillées par les déjections des villes ou lorsqu'elles n'ont pas traversé des couches gypseuses ;

« Mais les eaux courantes du bassin de la Seine sont troubles en temps de crue, louches en toute saison, chaudes l'été, froides l'hiver. Elles ont toujours une saveur prononcée et par conséquent ne sont pas agréables à boire.

On peut dire aussi qu'en général les eaux de rivière, dans le voisinage des grandes villes, sont corrompues par des détritus organiques de la nature la plus répugnante et que, depuis quelques années, cette corruption s'accroît très-rapidement.

En France, les populations rurales ne boivent presque jamais d'eau de rivière ; elles donnent la préférence aux eaux de puits et de sources, qui sont au moins agréables à boire, même lorsqu'elles sont privées des autres qualités des bonnes eaux potables.

Les eaux de sources, convenablement choisies, sont donc seules potables à l'état naturel. On n'a trouvé jusqu'ici aucun procédé pour ramener les eaux de rivière à cet état irréprochable. »

Nous démontrerons en effet plus loin que le filtrage est impuissant à produire la purification complète des eaux de rivière.

Il ne semble donc pas douteux que l'on doive toujours préférer une bonne eau de source à l'eau de rivière, et par conséquent les aqueducs de dérivation aux machines élévatoires, et on a eu raison, pour une ville comme Paris, d'aller chercher au loin et à grands frais les eaux de la Dhuis et de la Vanne.

Quand il s'agit d'une ville secondaire n'ayant que de faibles revenus, on ne peut pas toujours trouver immédiatement le gros capital nécessaire à la dérivation d'une source éloignée; on préfère grever le budget de chaque année de la dépense qu'occasionnera l'entretien et le fonctionnement des machines; dans ces conditions, l'installation de machines élévatoires peut être opportune. Mais, à

dépense égale, on devra toujours préférer les eaux de sources, qui n'exigent point l'usage de filtres dont le fonctionnement est souvent irrégulier.

DU FILTRAGE DES EAUX

Le filtrage est l'opération qui consiste à débarrasser les eaux de toutes les matières solides qu'elles tiennent en suspension. Le principe commun à tous les filtres consiste à faire passer l'eau à travers un corps poreux et perméable ; le liquide seul peut achever son voyage à travers les canaux fins et contournés du corps poreux et les corpuscules solides restent à la surface.

Il convient donc, avant de commencer la description des filtres, de connaître les circonstances du mouvement de l'eau à travers les corps poreux et perméables.

Lois de l'écoulement de l'eau à travers le sable et les terrains perméables. — C'est à Darcy qu'on doit les premières recherches sur les lois de l'écoulement de l'eau à travers le sable.

Il se servit de l'appareil représenté par la figure 3 planche 2 : dans une conduite verticale en fonte de $0^m,35$ de diamètre intérieur et de $3^m,50$ de hauteur, on a placé une cloison horizontale, composée de deux grilles superposées à angle droit, et sur cette cloison on a placé une couche d'épaisseur variable de bon sable siliceux présentant environ 38 pour 100 de vide. L'eau arrive au sommet de la conduite par un tuyau à robinet sous pression variable, elle traverse le sable et s'écoule dans un bassin gradué où on en mesure le volume ; deux manomètres à mercure placés l'un en haut, l'autre en bas. de l'appareil, permettent d'évaluer la pression sous laquelle l'écoulement s'effectue.

On a fait varier les charges et les hauteurs de sable et l'on a reconnu que le débit croit proportionnellement à la charge et en sens inverse de la hauteur du sable, pourvu que le sable conserve une nature constante.

Ainsi, pour un sable de même nature, on peut admettre que le volume débité est *proportionnel à la charge et en raison inverse de l'épaisseur de la couche traversée.*

On trouvera une explication rationnelle de ce résultat dans l'examen de la formule fondamentale de l'écoulement de l'eau dans les tuyaux.

Nous savons en effet que, dans un tuyau de rayon constant, il y a entre la charge h et la vitesse la relation :

$$h = \alpha u + \beta u^2 ;$$

or, la vitesse est proportionnelle au débit, donc

$$h = a.q + b.q^2.$$

Une couche de sable doit être considérée comme traversée par une infinité de petits tuyaux capillaires, ayant chacun un très-faible débit ; l'importance du terme en q^2 est donc très-faible par rapport à l'importance du terme en q et la relation précédente se réduit sensiblement à

$$h = a.q$$

D'après la loi de Darcy, en désignant par q le débit d'un filtre par mètre carré de section, par h la charge sous laquelle l'écoulement se produit, par e l'épaisseur de la couche filtrante, et par k un coefficient qui dépend de la nature du filtre, on a la relation :

$$q = k.\frac{h}{e};$$

$\left(\frac{h}{e}\right)$ n'est autre que la perte de charge j par mètre de parcours de l'eau à travers le sable, le débit q est proportionnel à la vitesse u, de sorte que l'équation précédente peut s'écrire :

$$j = \mu.u.$$

C'est la forme que lui donne Dupuit, et cette forme peut être considérée comme un résultat d'expérience.

Darcy, avec le sable siliceux renfermant 38 pour 100 de vide, a trouvé :

$$q = 0{,}0003.\frac{h}{e} = 0{,}0003.j$$

q est le débit par mètre carré, il est le produit du vide que présente cette section d'écoulement par la vitesse u, donc

$$q = 0{,}38.u$$

et il en résulte

$$j = 1266.u$$

Il s'agissait d'un gros sable; avec un sable fin, le débit n'est guère que de 6 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures sous une charge de $1^{m},50$, soit $4^{mc},5$ pour une charge et une épaisseur de 1 mètre; en admettant 30 pour 100 de vide, on trouve

$$j = 5760.u$$

Ces formules nous montrent combien la vitesse d'écoulement est faible; ainsi l'eau, qui traverse une couche de sable d'un mètre de hauteur, prend seulement une vitesse égale à $\frac{1}{5760}$, ce qui fait environ 0,000,02.

« Maintenant, si l'on imagine de l'eau s'écoulant à travers un pareil terrain, disposé sur le flanc d'un coteau ou dans le fond d'une vallée, la vitesse se trouve réduite à des centièmes et à des millièmes de millimètre et à des fractions plus petites encore pour des sables très-fins. Or, il s'agit là de terrains facilement perméables et la nature en présente de plus compactes et de plus serrés ; on voit donc que, dans l'ordre de phénomènes que nous étudions le coefficient μ représente toujours un nombre considérable, et que la vitesse u n'est jamais qu'une fraction de millimètre. »

Action des filtres. — Tous les corps poreux sont susceptibles de constituer des filtres, puisqu'ils retiennent dans leurs interstices les substances solides en suspension dans l'eau qui les traverse.

Dans les laboratoires, lorsqu'on veut séparer les précipités des liquides où ils se sont formés, on se sert de papier non collé, de tissus de diverses natures, de

plaques de terre cuite ou de gypse ; pour filtrer l'eau destinée à l'alimentation, on a recours à l'une des matières suivantes: cailloux, sable, gravier, pierre ponce, tissus fibreux, tels que la laine ou la bourre de laine, drap, feutre, flanelle, sciure de bois, coton, ouate, étoupe, crin, éponge, charbon de bois, noir animal.

Ces matières doivent être bien lavées au préalable, c'est-à-dire débarrassées de toutes les particules vaseuses ; elles s'engorgent par l'usage et doivent être plus ou moins fréquemment revivifiées par un lavage énergique.

Nous empruntons à la chimie technologique de Knapp (traduction Debize et Mérijot) les observations générales suivantes sur la question des filtres:

« *Action sur les matières en suspension.* — Lorsque de l'eau trouble traverse ces matières, les parties les plus grossières s'arrêtent à la surface ; les plus fines se déposent dans les canaux capillaires que forme la masse, et l'eau sort claire. On conçoit que, par l'effet même de cette clarification, les matières filtrantes doivent se charger d'impuretés, les canaux s'obstruent peu à peu, et il arrive enfin un instant où le filtre, ne laissant plus rien passer, doit être mis hors de service. Cet engorgement des filtres ne saurait jamais être évité d'une manière absolue, puisqu'il tient à la nature même des fonctions des appareils, mais on peut en réduire les effets en choisissant convenablement les matières filtrantes. Plus les pores de ces matières sont fins, plus tôt ils s'obstruent, et réciproquement. Ainsi le sable cesse d'agir beaucoup plus tôt que les cailloux. Il suit de là que les filtres doivent être formés de couches successives de matières à gros grains, suivies de couches à grains fins. L'eau, passant d'abord sur les premières, s'y débarrasse de ses impuretés les plus grossières, qui ne viennent plus engorger les couches suivantes. Celles-ci conservent donc leur action plus longtemps, sans que les couches supérieures soient mises hors de service, et la durée totale du filtre se trouve notablement augmentée. Lorsqu'un filtre est engorgé et n'agit plus, si l'on y fait passer de l'eau pure en sens inverse du trajet habituel, cette eau reprend une grande partie des impuretés déposées dans les interstices et à la surface. On peut de la sorte renouveler, pour ainsi dire, la matière filtrante et lui rendre, sinon toute sa valeur primitive, au moins une grande partie de son action. En traversant les pores étroits d'un filtre, l'eau éprouve des frottements qui doivent être vaincus par une charge suffisante de la colonne liquide. Une augmentation de la charge peut donc faciliter notablement la filtration, mais, au delà d'une certaine limite, elle la gêne, parce que la matière du filtre, surtout quand elle est élastique, est trop fortement pressée, et que la circulation de l'eau y devient plus difficile. On distingue donc les filtres sous pression des filtres ordinaires sans pression. Les filtres peuvent d'ailleurs être disposés à volonté pour que l'eau les traverse soit de haut en bas, soit de bas en haut, soit horizontalement. On choisit dans chaque cas particulier celui de ces dispositifs qui offre le plus d'avantages.

Action sur les corps en dissolution. — Ce serait une grave erreur de croire que l'effet des filtres est purement mécanique, qu'ils se bornent à séparer par tamisage les impuretés visibles de l'eau. Les matières filtrantes exercent en outre une influence importante sur les principes dissous dans l'eau, en vertu des lois de l'attraction moléculaire.

Presque tous les corps solides, et probablement tous, jouissent en effet de la propriété de condenser les gaz. (On connait l'effet du platine sur l'hydrogène. L'action du palladium sur le même gaz, récemment découverte par Graham, constitue un phénomène du même genre encore plus frappant). Les corps pos-

sèdent également la propriété de retenir à leur surface et de précipiter par attraction les matières solides en dissolution dans les liquides et notamment dans l'eau. Cette action moléculaire est assez énergique pour troubler l'équilibre des forces chimiques et déterminer certaines décompositions. Elle dépend essentiellement du volume du liquide dissolvant, de l'étendue des surfaces actives, et, toutes choses égales d'ailleurs, est beaucoup plus forte pour les corps poreux et divisés que pour les matières compactes et denses, plus faible pour les dissolutions très-étendues que pour les liquides concentrés. Enfin, la nature même des dissolutions et celle de la surface active interviennent dans ces questions. Ainsi l'effet est beaucoup plus sensible pour le platine et le palladium que pour les autres métaux, pour le charbon que pour le sable : le noir animal possède, surtout sous ce rapport, des propriétés très-marquées. Ces facultés d'absorption par les surfaces jouent d'ailleurs un rôle extrêmement important dans la plupart des phénomènes de la vie. C'est grâce à elles que les plantes s'assimilent les matières minérales que le sol renferme à l'état soluble. Ce sont elles qui permettent dans les arts d'effectuer la précipitation de diverses matières végétales ou animales, ce sont elles qu'on applique notamment dans la teinture, le tannage. Enfin, ce sont elles qui font la base des actions décolorantes et désinfectantes des charbons, etc. Dans la filtration des eaux, l'effet de ces forces n'est pas très-grand, d'une part, parce que la plupart des matières qu'on emploie comme filtres, telles que le sable, ne possèdent pas cette propriété absorbante à un haut degré; d'autre part, parce que le volume de l'eau est considérable par rapport aux quantités de matières qu'elle tient en dissolution.

Action sur les matières organisées. — Le noir animal et les charbons organiques provenant de matières animales ont une action filtrante beaucoup plus marquée que le charbon de bois, mais ils sont d'un prix beaucoup plus élevé pour le travail en grand. Au contraire, le charbon de bois peut s'employer presque partout, et il est surtout utile lorsqu'on a à traiter des eaux chargées de matières organiques. Dans ces sortes d'eaux, en effet, quand elles séjournent quelque temps à l'air, surtout pendant l'été, les principes organiques se décomposent et passent à un état très-favorable au développement des végétations microscopiques et des infusoires dont l'air contient les germes. Ces êtres organisés se développent suivant les circonstances, tantôt au bout de quelques jours, tantôt en deux ou trois semaines seulement. La lumière et l'air sont favorables à la plupart de ces formations microscopiques; cependant plusieurs d'entre elles (parmi les infusoires) se trouvent mieux de l'obscurité, quelques variétés enfin, les algues, les infusoires verts et les entomostracées, ne peuvent prendre naissance à la lumière. Le froid et le mouvement de l'eau leur sont contraires. Elles se développent également moins bien dans les réservoirs profonds (3 mètres et plus) dont les couches inférieures sont trop éloignées de l'air et de la lumière.

D'après les recherches d'Arthur Hassal sur des eaux croupies, le papier à filtrer, le sable et les filtres en grès laissent passer les infusoires. Le charbon de bois ne laisse passer que les petites variétés; le noir animal les retient complétement, de même que l'argile grasse; quand on observe des eaux filtrées à l'aide de ces derniers agents, on remarque que les végétations microscopiques y reparaissent rapidement, et l'on doit en conclure qu'au moins leurs germes et leurs œufs ont échappé à l'action du filtre. Il est d'ailleurs important d'enlever à l'eau ces matières organisées, parce qu'elles provoquent des nausées, et les animaux qu'elles peuvent contenir, les larves, peuvent exercer sur la santé une influence fâcheuse. La difficulté du problème sera d'ailleurs justifiée, si

l'on rappelle que les globules de beurre, infiniment plus gros, que renferme le lait, ne peuvent en être séparés que par le noir animal et l'argile, mais traversent sans s'y arrêter le charbon de bois, le sable, etc.

Absorption des gaz. — La filtration enlève à l'eau une partie de sa teneur en gaz. Certains de ces principes sont absorbés par les matières du filtre, les autres sont mis en liberté par un effet analogue à celui que produisent tous les corps pulvérulents. Cette élimination, quand elle porte sur les gaz nuisibles de l'eau, est une bonne chose ; elle est fâcheuse quand elle agit sur les gaz qui doivent s'y trouver normalement. D'après Hassal, l'hydrogène sulfuré des eaux d'égout putréfiées n'est absorbé d'une manière complète que par le charbon de bois et surtout par le noir animal ; son élimination n'est que partielle avec l'argile, le sable, etc. L'acide carbonique est éliminé presque complètement par toutes les matières, qui réduisent également dans une forte proportion les autres gaz, savoir, l'oxygène et l'azote.

« Les conditions que doit remplir une eau filtrée dans une distribution publique sont : la clarté complète, l'absence de végétaux ou d'animaux microscopiques, l'élimination aussi complète que possible de matières organiques, surtout de matières en décomposition. L'eau doit enfin avoir une température convenable, être aussi douce que possible et contenir la proportion normale d'acide carbonique et des gaz de l'atmosphère. Ces diverses conditions ne sont guère remplies que par à peu près, et les dernières surtout, relatives à la présence des éléments gazeux, laissent souvent à désirer. Du reste, dans les distributions d'eau, on a beaucoup plus en vue de transformer l'eau mauvaise en eau utilisable qu'en eau de bonne qualité pour la boisson. »

Classification des filtres. — On distingue les filtres en filtres artificiels et filtres naturels. Nous les étudierons successivement, en examinant d'abord les grands filtres en usage dans les distributions d'eau et donnant ensuite quelques indications sur les filtres d'usage domestique.

FILTRES ARTIFICIELS

L'avantage d'une plus grande pureté dans l'eau des rivières considérée chimiquement, dit Arago, est bien plus que compensé par leur manque habituel de limpidité ; à chaque averse, les eaux torrentielles, pendant leur course précipitée, se chargent de terre végétale, de glaise, de graviers, de toutes sortes de détritus qu'elles arrachent au sol, et l'ensemble de ces matières est entraîné jusqu'au lit des rivières.

La Seine, lors des forts troubles, tient en suspension un demi-gramme de matière solide par litre et le Rhône 1 gramme.

Les eaux troubles des rivières ne paraissent point nuisibles à la santé ; l'absorption des eaux limoneuses du Nil ne paraît point malsaine, cependant les médecins lui attribuent quelques affections des voies urinaires. Quoi qu'il en soit, il est certainement très-désagréable de boire des eaux chargées de limon, et on doit chercher le moyen de leur rendre toute la limpidité désirable.

Clarification par le repos. — Il semble, au premier abord, bien facile de rendre aux eaux leur limpidité altérée par les matières solides en suspension,

il suffit de les amener dans des bassins où on les laissera déposer quelqu temps, et d'où on les décantera par un déversoir de superficie.

Mais, on reconnaît par l'expérience que la précipitation est très-lente; le plus grosses matières se précipitent très-vite, mais les poussières vaseuses n sont pas encore tombées après plusieurs jours de repos.

C'est ce qu'on a reconnu avec les eaux de la Garonne et du Rhône : au bou de cinq ou six jours, on a une limpidité approximative, mais il faut dix jour au moins pour arriver à la limpidité parfaite.

Ce procédé est donc inapplicable dans une grande ville, à cause du nombr et de l'étendue des bassins, qu'il faudrait construire.

Il est, du reste, des eaux que le repos ne clarifie jamais; telles sont les eau blanches de Versailles qui ont pris au contact de la marne une apparence lai teuse.

S'il fallait laisser séjourner de grandes masses d'eau pendant dix jours dan des bassins, la putréfaction et les végétations infusoires ne tarderaient pas à s'établir lors des chaleurs; on obtiendrait des eaux nauséabondes, désagréable et dangereuses.

Ainsi, il faut reconnaître avec Arago que le repos ne pourrait pas être adopté comme méthode définitive de clarification de l'eau destinée à l'alimentation de grandes villes; mais, il peut être considéré comme un moyen de la débarrasser de tout ce qu'elle renferme de plus lourd et de plus grossier. C'est sous ce point de vue seulement, que des récipients de dépôt ont été préconisés et établis en Angleterre et en France.

Filtres en sable et gravier. — Il existe plusieurs systèmes de filtres composés de couches successives de sable ou de gravier. Voici, d'après Darcy, la description des plus connus :

La figure 1 de la planche I représente une coupe d'un des filtres de Chelsea: *aa*, couche de sable très-fin; *bb*, couche de sable et de gravier; *cc*, couche de coquillages; *d*, couche de gros gravier dans laquelle sont construits les drains circulaires *e*,*e*,*e*,*e*. Ces drains sont en briques; ils ont trois pieds anglais (0^{m},914) de diamètre extérieur, sur une brique d'épaisseur. Le filtre ou l'ensemble des couches repose sur un lit de glaise de 0^{m},60 d'épaisseur. (La figure 2 donne sur une plus grande échelle la disposition et l'épaisseur des couches.) Des ventouses ont été ménagées pour l'évacuation de l'air intérieur. L'ondulation des couches permet de mettre à sec une partie de la superficie pour en opérer le nettoiement, tout en laissant l'eau dans le creux des surfaces ondulées. Les joints des drains sont en partie faits en ciment, et en partie laissés ouverts ou sans ciment, pour la pénétration de l'eau dans l'intérieur. L'eau est admise à l'une des extrémités du filtre par neuf tuyaux; elle frappe d'abord contre des planches courbes qui servent à modérer son action sur la couche *aa* et à *l'étaler* uniformément sur le filtre. La Compagnie de Chelsea possède deux filtres pareils. La longueur de chacun de ces filtres est de 240 pieds anglais, soit 75 mètres et la largeur de 180, soit 55 mètres.

Filtre de Southwark. — Le système de filtrage adopté par la Compagnie de Southwark comprend à la fois des réservoirs de dépôt (settling reservoirs) et des filtres proprement dits. L'eau séjourne dans les réservoirs de dépôt avant d'arriver, par un écoulement de superficie, sur les filtres[1]. La figure 3 de la

[1] La Compagnie de Chelsea a également adopté aujourd'hui l'usage préparatoire des réservoirs de dépôts. Ces derniers sont au nombre de trois et présentent une superficie de 1 hectare 1/2. Je ne reviendrai point sur les inconvénients qui résultent du séjournement prolongé de l'eau

planche I représente une coupe des réservoirs de dépôt de la Compagnie de Southwark; leur superficie totale est de 5 acres anglais, ou de 3400 mètres; leur profondeur de 13 pieds 6 pouces anglais, ou $3^m,965$; le fond de ces réservoirs présente une inclinaison, descendant à un caniveau central demi-circulaire coté *b* : il est construit en maçonnerie de briques et ciment; son diamètre est de 6 pieds anglais $1^m,815$. Lors du nettoiement du réservoir, la vase déposée sur le fond est balayée dans le caniveau, puis entraînée au dehors par un courant d'eau artificiel.

Quant aux filtres, ils sont construits de la même manière que ceux de la Compagnie de Chelsea, que nous venons de décrire, et sont au nombre de deux : l'un a une superficie de 2,900 mètres carrés; et l'autre, de 7,840 mètres. La quantité d'eau filtrée, sous une charge variant de $1^m,20$ à $1^m,30$, est de 30 à 35,000 mètres cubes par vingt-quatre heures (c'est-à-dire 4 mètres cubes par mètre carré et par jour). La composition des couches de ces filtres est indiquée figure 4. L'eau des réservoirs de dépôt A, que l'on a toujours le soin de prendre à la superficie, est versée sur la surface des filtres C, puis, traversant ces derniers, elle pénètre dans les grands drains circulaires en briques, d'où elle se rend clarifiée dans le puisard des machines à vapeur D.

Filtre de Thomas Ditton. — L'appareil de Thomas Ditton se compose de quatre filtres, présentant une superficie totale de 2,900 mètres carrés. Leur niveau est inférieur à celui de la Tamise, dont les eaux se répandent sur les filtres, en passant par une série de tuyaux en fonte munis chacun d'un robinet vanne.

Voici quelques détails sur le mode de construction de chacun de ces filtres. Sur le fond d'une excavation pratiquée dans le sol, a été construite une série de murs parallèles, sur lesquels reposent de fortes dalles en ardoise du pays de Galles; elles sont placées de champ et assez rapprochées, pour que les cailloux superposés ne puissent passer dans l'intervalle laissé entre elles. On voit ainsi qu'il existe, au-dessous du lit de filtration, un véritable réservoir de $1^m,30$ de hauteur. La figure 5 donne la composition des couches filtrantes de l'appareil de Thomas Ditton. Il fonctionne sous une charge moyenne de $2^m,50$, et produit en vingt-quatre heures 7,850 litres par mètre carré.

Le nettoiement du filtre a lieu trente-six fois par an; chaque opération nécessite l'emploi de vingt-cinq hommes, pendant cinq heures environ, et la quantité de sable enlevé est d'environ 1 centimètre de hauteur. Lorsque l'épaisseur de la couche de sable fin est réduite de moitié (c'est-à-dire de $0^m,90$ à $0^m,45$), on recharge la couche de manière à la ramener à sa puissance primitive de $0^m,90$. Le sable enlevé est lavé à grande eau et sert alors à recharger le filtre.

Établissement d'York. — Deux machines de quarante chevaux chacune élèvent l'eau de la rivière, dans deux bassins de dépôt de 75 mètres de longueur sur 50 mètres de largeur chacun, comme l'indique la figure 6. Les eaux arrivent dans l'un et dans l'autre de ces bassins par les points E et E', au moyen de deux robinets-vannes AA, que l'on ouvre et ferme alternativement. On laisse reposer l'eau, et ensuite on la dirige sur les filtres (*fig.* 7), en ouvrant successivement deux robinets-vannes, placés en F, à $0^m,50$ au-dessus du fond des bassins d'épuration, pour ne pas entraîner le limon et les dépôts. Ce limon peut être extrait des bassins d'épuration par un trou O, placé au centre de chaque

dans ces vastes réservoirs, où sous l'influence de l'action solaire, la vie végétale et la vie animale, se développant avec activité, altèrent profondément la pureté initiale du liquide.

bassin, au point le plus bas du radier, et réuni par un tuyau à un puits B, qui, lui-même communique à la rivière au moyen d'un robinet-vanne. Ces tuyaux ont 0m,30 de diamètre. Le puits porte, vers sa partie supérieure, un orifice rectangulaire, qui sert de déversoir de superficie aux bassins d'épuration. Les eaux arrivent dans ces bassins, par la partie supérieure, au moyen de tuyaux de 0m,50 de diamètre.

Pour ne pas dégrader les talus, qui sont cependant perreyés, on fait couler les eaux sur un conduit en pierre de taille CE, qui se termine au fond par une grande dalle. Ces bassins ont des talus intérieurs et extérieurs inclinés à 1m50 de base pour 1 mètre de hauteur. Ils sont perreyés en petits matériaux et ont environ de 6 à 7 mètres de profondeur. Le fond est réglé en pente faible dans tous les sens vers le centre, afin que les eaux et le limon affluent vers le point O.

Les eaux encore louches des bassins d'épuration peuvent être dirigées, au moyen du robinet vanne F, dans un quelconque des trois filtres E', E'', E'''. Ces bassins sont revêtus d'une couche de béton de 0m,30 environ. Au centre et dans l'axe longitudinal, existe un drain en briques de 22 pouces anglais (0m,55 environ) de diamètre. Ce tuyau principal se raccorde avec de petits tuyaux en poterie, parallèles entre eux, diagonalement disposés et percés de trous. Ces derniers eux-mêmes communiquent par leurs extrémités avec deux drains en poterie placés parallèlement aux drains centraux sur les bords des bassins.

Cet ensemble de tuyaux est recouvert par deux couches, l'une inférieure en gravier de 4 pieds anglais d'épaisseur, l'autre en sable fin, d'une épaisseur égale. Le gravier et le sable sont préalablement disposés chacun en deux couches, de manière à graduer la finesse des matières depuis la base jusqu'au sommet.

L'eau entre à la surface du sable fin (qui est disposé par petites vallées) au moyen de trois tubes en fonte (*fig.* 8), aboutissant dans des boîtes en bois, pour éviter l'affouillement du sable. En avant de ces boîtes, il existe des bondes de fond, qui peuvent s'ouvrir à volonté, vider rapidement l'eau et mettre le filtre à sec.

Les galeries inférieures en briques communiquent avec une galerie GG fig. 7, qui va aboutir à un puits, d'où les machines les élèvent dans un réservoir supérieur placé à une distance de quelques centaines de mètres des filtres, et d'un niveau supérieur à celui des édifices les plus élevés de la ville. Des tuyaux verticaux en fonte communiquent avec les galeries en briques des filtres; ils permettent le dégagement de l'air au moment de la mise en charge. Enfin des conduites en fonte communiquent d'un côté avec le fond du filtre et de l'autre avec la rivière, et munies de robinets vannes, donnent le moyen de vider à volonté les filtres.

Établissement de Hull. — Cet établissement se compose (*fig.* 9) : 1° d'un grand bassin de dépôt de 300 mètres environ de longueur et de 25 mètres de largeur, terminé par deux demi-cercles;

2° D'un bassin de filtration de même dimension;

3° D'une prise d'eau à la rivière qui permet, au moyen des vannes, de faire entrer l'eau soit dans l'un, soit dans l'autre de ces bassins;

4° De deux machines à vapeur à simple effet, de la force de soixante-cinq chevaux chacune, élevant les eaux à une hauteur de 160 à 175 pieds anglais;

5° D'une tour contenant deux conduites en fonte, par l'une desquelles l'eau

monte d'un côté pour redescendre de l'autre, afin d'alimenter la ville [1].

Le bassin de filtrage se compose d'un rectangle de 300 mètres de longueur et de 25 mètres de largeur totale, terminé par deux demi-cercles avec talus à $1^m,50$ de base pour 1 mètre de hauteur. Une couche (*fig.* 10) de 4 à 5 pieds anglais, dont la partie supérieure est en sable et la partie inférieure en gravier, recouvre une galerie centrale et des galeries transversales toutes perméables. La hauteur de l'eau dans le bassin de filtrage est de $1^m,10$; elle peut aller à $1^m,30$ ou $1^m,40$. La différence de niveau de l'eau filtrée et de l'eau trouble n'était que de $1^m,45$ le jour où M. de Montricher, qui a recueilli les renseignements relatifs aux appareils de York et de Hull, a visité cet établissement. Des petits puits (*fig.* 10) laissent communiquer la galerie inférieure avec l'air libre.

Le filtre peut marcher environ deux mois sans être nettoyé; il faut une journée de trente hommes pour faire cette opération. On enlève une petite croûte de limon; quand on a fait disparaître une certaine couche de sable, on la remplace par du sable nouveau, de manière à établir l'épaisseur primitive de la couche filtrante. Pendant qu'on nettoie le filtre, on donne à la ville de l'eau du bassin de dépôt non filtrée. Le sable est entièrement de niveau dans ces filtres; il n'y a pas de vallées comme dans les autres filtres.

La population de Hull est de 100,000 âmes environ ; la quantité d'eau fournie étant de 200 litres par seconde, soit 172,280,000 litres par vingt-quatre heures, il en résulte qu'on distribue 172 lit. 80 par habitant.

Le système de clarification adopté pour les eaux de Hull démontre la possibilité d'opérer le filtrage sur une très-grande échelle.

Écosse. — Filtre de Paisley. — Dans les filtres que nous venons de décrire, la clarification de l'eau s'opère par son passage spontané à travers les couches de sable. Ils sont appelés pour cette raison, par les ingénieurs anglais, *filters self acting*. Ces derniers ont cherché aussi des filtres se nettoyant eux-mêmes, ou *filters self cleansing*. La description du filtre de Paisley, construit par M. Thom, nous fera connaître le moyen imaginé par cet ingénieur pour obtenir le résultat cherché. Ce filtre a 100 pieds anglais de longueur sur 60 de largeur, c'est-à-dire une superficie de 660 mètres carrés environ, laquelle est divisée en trois compartiments pouvant fonctionner séparément. Voici le mode de construction de l'appareil.

Il a été pratiqué une excavation de 6 à 8 pieds anglais de profondeur ($2^m,40$); des murs de revêtement l'environnent, et sur le fond a été appliquée une couche de terre glaise de $0^m,30$ d'épaisseur, revêtue d'un pavage cimenté; des briques posées de champ recouvrent ce pavage; leurs rangs parallèles, qui laissent entre eux un intervalle libre de 6 millimètres, sont recouverts par une surface formée de tuiles plates perforées d'une infinité de petits trous d'environ $2^{mm},50$ de diamètre. Sur cette espèce d'écumoire en tuiles plates se trouvent étalées six couches de gravier ayant chacune 25 millimètres d'épaisseur et dont la ténuité va croissant jusqu'à la couche supérieure, qui est composée de gravier très-fin ou de sable très-gros. Par dessus ces six couches est une épaisseur de $0^m,45$ de sable très-fin et très-vif. Enfin une dernière couche de 15 centimètres de puissance, composée d'un volume de charbon animal, sur neuf volumes de sable

[1] Ces espèces de châteaux d'eau, fort usités en Angleterre, ont pour objet de faire disparaître ou du moins d'atténuer fortement la difficulté qui résulte de l'inertie de la masse d'eau contenue dans la conduite ascensionnelle. On les remplace aujourd'hui, avec avantage et moins de dépense, par de grands réservoirs d'air.

vif et fin, complète ce filtre. M. Thom a remplacé plus tard le charbon animal par le trap rock (en poudre) provenant des collines qui dominent la ville de Greenock.

Les fig. 11, 12 et 13, pl. I, représentent en plan et en coupes les dispositons générales des filtres de Paisley. AA, caniveau en pierre amenant l'eau au filtre; BB, tuyaux verticaux en fonte ayant chacun deux orifices d'écoulement, l'un qui déverse l'eau sur la superficie du filtre, l'autre qui introduit le liquide au-dessous des couches filtrantes ; chacun de ces deux orifices est muni d'une vanne d'arrêt. CCC, passages de l'eau filtrée quittant l'appareil ; ils sont également munis de vannes. DD, caniveau conduisant l'eau filtrée dans le grand réservoir E. FF, passages pour l'écoulement de l'eau pendant le nettoiement du filtre. L'opération du nettoiement a lieu en fermant les orifices des tuyaux BB, qui déversent l'eau sur la superficie et, en ouvrant les vannes qui admettent l'eau au-dessous des couches filtrantes. Les vannes des passages CC sont fermées et celles des passages FF ouvertes. L'eau bouillonne à travers les couches de gravier et de sable, en passant de bas en haut, les remue profondément et s'écoule par les orifices F, emportant les impuretés déposées dans les interstices du sable. Lorsque cette eau sort pure et limpide, l'opération est terminée. GG, caniveau par lequel s'écoule le liquide chargé d'impuretés.

Outre ce moyen de nettoiement employé une fois par mois, on enlève, avec de larges planches munies d'un manche, une épaisseur de sable de 1 centimètre. Le filtre n'est rechargé de sable qu'une fois ou deux par an ; deux hommes en une demi-journée suffisent pour l'enlèvement du sable, et aussi pour recharger le filtre. On compte environ cinquante journées d'hommes employés à ce travail dans le courant de l'année, et la quantité de sable chargé dans le même temps est en moyenne de 180 mètres cubes.

La quantité d'eau filtrée par vingt-quatre heures est en moyenne de 106,682 pieds anglais, soit 3,019 mètres cubes, soit environ 4,500 litres par mètre carré pour vingt-quatre heures. Le coût de cet appareil a été un peu moins de 600 livres sterling, soit 15,000 francs.

Les eaux, avant de s'écouler sur le filtre, séjournent dans deux réservoirs de dépôt, pour laisser le limon se précipiter avant la filtration ; l'un de ces réservoirs a 16 hectares de superficie sur 9 mètres de profondeur, l'autre 2 hectares sur même profondeur.

Filtres de Marseille. — Ces filtres sont couverts ; le bassin de filtrage se compose de deux parties :

La superficie de l'une est.	4,800 mètres.
Celle de l'autre.	4,000 —
Total.	8,800 —

pour la superficie filtrante. Ils produisent moyennement un litre et demi par seconde, par 10 mètres carrés, soit 13 mètres cubes par vingt-quatre heures et par mètre.

L'épaisseur du lit de filtration est de $0^m,80$, savoir :

Sable très-fin de Montredon.	$0^m,30$
Sable moyen de Goudes.	$0^m,08$
Gros sable de Rion.	$0^m,18$
Petit gravier du Prado.	$0^m,12$
Pierres concassées passant par un anneau de $0^m,06$.	$0^m,12$
Total.	$0^m,80$

Cette couche est supportée par des voûtes en moëllons traversées par des tuyaux en poterie de $0^m,04$ de diamètre. C'est par ces orifices que les eaux filtrées tombent dans le réservoir inférieur ; c'est aussi par leur moyen que s'établit le courant ascensionnel dont je vais parler.

Le nettoiement de ces filtres s'effectue tous les huit ou dix jours, suivant que les eaux de la Durance ont été plus ou moins chargées dans cette période. On a établi sur le parcours du canal, en amont des filtres, trois ou quatre grands bassins d'épuration où les eaux déposent la plus grande partie de leur limon ; les eaux de la Durance sont parfois tellement troubles que sans cette précaution les filtres seraient engorgés, en cinq ou six heures, à un point tel que le nettoiement par un courant dirigé de bas en haut ne serait plus praticable.

Les filtres pourraient fonctionner plus de huit ou dix jours, car au bout de ce temps ils fournissent encore plus de 0 lit. 13 par seconde et par mètre carré de surface, produit réclamé par les besoins de la distribution, mais l'expérience a démontré que le nettoiement est d'autant plus facile que la couche de vase séjourne moins longtemps sur le sable. La charge sur les filtres est variable ; elle est d'abord très-faible au commencement de l'opération, $0^m,40$; mais on l'augmente successivement au fur et à mesure que les filtres s'engorgent, et elle est d'environ $0^m,80$ à 1 mètre à la fin de l'opération.

Pour que le nettoiement s'opère complétement par un courant de bas en haut, il faut que le filtre débite dans ce sens 0 lit. 30 à 0 lit. 35 par seconde et par mètre carré, ce débit exige une sous-pression d'environ $0^m,60$ de hauteur d'eau. Alors le limon est déblayé et emporté rapidement dans les canaux de décharge. Pour protéger la surface du filtre contre les ravinements pendant le lavage, on a soin de disposer les lieux de manière à maintenir une tranche d'eau de $0^m,10$ d'épaisseur sur la surface du sable.

Lorsque le volume d'eau arrivant de bas en haut est, comme il est dit ci-dessus, de 0 lit. 30 à 0 lit. 35 par seconde et par mètre carré, le sable est parfaitement nettoyé dans quatre ou cinq heures au plus. La tranche d'eau qu'on y maintient le garantit si complétement, qu'on ne s'est pas aperçu, après un an de service, que le niveau primitif du sable se soit abaissé. Mais si le volume d'eau, arrivant de bas en haut, est réduit à 0 lit. 20 par seconde et par mètre carré, on est obligé de favoriser l'enlèvement du limon, en le remuant par les moyens déjà décrits dans les filtres anglais.

Lorsqu'après le nettoiement on remet l'eau sur les filtres, elle conserve une teinte ocreuse pendant les premières heures ; le courant de bas en haut a-t-il déposé dans le filtre, pendant la durée de l'opération, une légère couche de limon ? ou bien encore le sable soulevé par la sous-pression présente-t-il à l'eau des conduits plus larges qu'après son tassement par une action en sens inverse ? Quoi qu'il en soit, au bout de huit à dix heures au plus, l'eau est redevenue très-limpide.

En résumé, on peut déduire de cette description des principaux filtres d'Angleterre et de France les faits suivants :

1° En ce qui concerne la composition des filtres, ils présentent deux couches principales : l'une inférieure en gravier, servant de support au filtre ; l'autre en sable fin, formant le filtre proprement dit. L'épaisseur de la première varie entre $0^m,30$ à $0^m,90$, celle de la seconde entre $0^m,60$ et $0^m,90$;

2° En ce qui concerne les eaux filtrées, elles sont recueillies, à l'exception du mode suivi dans les filtres de Paisley et de Thomas Ditton, par un système de tuyaux de drainage généralement posés comme il suit : l'un central, dans le sens

de la longueur du filtre, les autres à peu près normaux à ce dernier et se raccordant avec lui. Je crois le premier mode préférable : en effet, l'eau filtrée doit éprouver moins de difficulté à descendre directement dans le réservoir inférieur qu'à pénétrer dans les drains ;

3° En ce qui concerne le débit des filtres, il varie entre 3 mètres cubes et 13 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures, ainsi qu'il résulte du tableau ci-dessous :

Nos D'ORDRE	DÉSIGNATION DES FILTRES	SUPERFICIE DES FILTRES	ÉPAISSEUR D'EAU SUR LE FILTRE	QUANTITÉ FILTRÉE EN VINGT-QUATRE HEURES	
				QUANTITÉ TOTALE	PAR MÈTRE CARRÉ
		mètres	mètres	m. c.	m. c.
1	Chelsea (Londres).	8,040	1,25	44,000	5,4
2	Grand-Junction (Id.).	600	1 à 1,25	18,000	3,00
3	Southwark et Vauxhall (Id.).	10,800	1,30	3,150	4,00
4	Lambeth : Thomas Ditton (Id.). . .	2,880	2,50	22,500	8,00
5	Paisley (Écosse).	660	0,10 à 0,20	7,000	10,00
6	Marseille.	8,800	0,40	114,000	13,00

4° En ce qui touche le nettoyage des filtres, il suffit pour l'obtenir d'enlever une épaisseur de sable égale à 1 ou 2 centimètres ; l'expérience apprend, en effet, qu'après le passage d'une grande quantité d'eau, très-chargée de matières étrangères en suspension, au travers d'une couche de sable, ces matières, quelque ténues qu'elles soient, ne pénètrent d'une façon notable qu'à 2 centimètres au maximum au-dessous de la surface de cette couche, et qu'à 15 centimètres de cette même surface il est impossible de découvrir la moindre souillure de ce sable.

De là dérivent deux conséquences : 1° l'inutilité de donner à la couche de sable plus de 0m,20 d'épaisseur, pourvu qu'on ait soin d'en renouveler en temps utile la surface; 2° la possibilité de réduire la couche support à quelques centimètres.

Ainsi M. Sagey, ingénieur des mines, qui a obtenu à l'Exposition universelle une médaille d'or pour l'application de procédés ingénieux à la ventilation des maisons centrales, m'a dit avoir établi au château de Spoir, près de Chartres, un filtre qui fonctionne très-bien et dont l'épaisseur totale est de 0m,18, savoir :

Couche support.	0m,08
Couche filtrante.	0m,10
Total.	0m,18

Les eaux, il est vrai, ne sont pas très-chargées de limon.

« **Filtration au charbon.** — Avant de traiter de l'emploi du charbon dans la filtration en grand, nous pourrions nous demander : *Une semblable filtration existe-t-elle? est-elle praticable?* Cette question paraîtra plus que singulière, alors que, depuis un demi-siècle, un grand établissement fonctionne à Paris, sous les yeux de l'administration, avec l'approbation de plusieurs sociétés sa-

vantes, et que l'on y fait grand bruit de l'application, à la purification de l'eau de la Seine, des découvertes de Lowitz, de Bertholet, de Saussure, etc., qui, comme on le sait, ont fait connaître les propriétés décolorantes et désinfectantes du charbon. La question, avons-nous dit, paraîtra singulière, et, cependant, il faut se résigner à accepter la réponse, qui *est négative*, et à reconnaître avec M. Soubeiran *qu'il n'existe point de filtre à charbon proprement dit, car la dépense qu'il occasionnerait serait telle que l'eau ne pourrait être livrée qu'à un prix très-élevé*. Hâtons-nous d'ajouter que nous ne prétendons nullement incriminer la bonne foi des inventeurs du procédé mis en pratique à l'établissement du quai des Célestins. Ils se sont laissé abuser par une illusion qui ne peut plus être partagée par les savants. Nous emprunterons les principaux arguments de la discussion à laquelle nous allons nous livrer à un rapport rédigé par M. Gaultier de Claubry, membre avec MM. H. Royer-Collard et Donné d'une commission chargée par la compagnie du filtrage Fonvielle de se livrer à des recherches sur l'utilité de l'*emploi du charbon pour le filtrage en grand des eaux destinées aux usages domestiques*. Il résulte des expériences de la commission que le pouvoir désinfectant du charbon s'exerce dans des limites plus rapprochées qu'on ne le croit généralement. Ainsi, suivant que l'eau à désinfecter est très-fétide ou seulement peu odorante, le poids du charbon à employer variera de 1/150 à 1/600 de celui de l'eau. « Si nous admettons pour limite extrême qu'un kilogramme « de charbon peut dépurer complétement 1,000 litres ou 10 hectolitres d'eau à « peine odorante, nous aurons fait une part très-large à cette action. »

« Si nous appliquons cette évaluation aux appareils de filtrage, nous arriverons à des chiffres qui mettent en évidence l'impossibilité de l'application du charbon à la purification des eaux sur une grande échelle. La ville de Paris dépense aujourd'hui un volume d'eau supérieur à 300 *pouces du fontainier*, soit 600,000 hectolitres (vers 1860). Supposons que la portion d'eau vendue par les compagnies qui emploient des filtres au charbon soit égale à la *soixantième partie* de cette quantité, le chiffre de cette fraction s'élèvera encore à 10,000 hectolitres, qui nécessiteront l'emploi de 1,000 kilogrammes de charbon, c'est-à-dire une dépense quotidienne de 300 francs environ. Cette dépense pourra être recouvrée en partie, il est vrai, par le réemploi du charbon après épuration, mais elle sera toujours beaucoup trop considérable pour qu'on n'admette pas *à priori* l'opinion émise par M. Gaultier de Claubry « que dans les filtres montés au charbon, soit « dans les grands établissements, soit dans les fontaines domestiques, la pro- « portion de charbon employé n'a aucun rapport avec la masse d'eau qu'il s'a- « git de dépurer, et que, si ce corps exerce dans les premiers instants une ac- « tion désinfectante, il n'agit bientôt plus que comme matière filtrante. »

« Nous ne devons pas omettre de consigner ici le fait important signalé dans son rapport par M. Gaultier de Claubry, de l'absorption d'une partie de l'air tenu en dissolution dans l'eau par le seul contact de ce liquide avec le charbon. Ce serait là un inconvénient de l'emploi de ce corps comme agent de filtration.

« Quoi qu'il en soit, les filtres de l'établissement du quai des Célestins contiennent de la *braise* de boulanger, dont les pouvoirs désinfectant et décolorant sont inférieurs à ceux du *noir d'os;* il paraît qu'on lave ces filtres six à sept fois par mois, et qu'on se borne à soumettre le charbon à l'*aération* pendant quelques jours, pratiques insuffisantes pour enlever la portion notable de principes organiques dont ce corps absorbant s'est pénétré et lui rendre ses propriétés premières. »

Il résulte de cette discussion qu'on ne peut songer à l'emploi du charbon pour la purification des grandes masses d'eau.

Prix de revient du filtrage. — Dans les filtres de l'East London Company, le prix de revient de la filtration de 1,000 mètres cubes est de 8 francs environ, ou de 2 francs si on ne fait pas entrer en ligne les intérêts du capital d'installation.

L'entretien et l'exploitation des filtres de Chelsea reviennent à 75 francs par jour pour 22,000 mètres cubes d'eau filtrée. Ainsi, on a pour la dépense par 1,000 mètres cubes d'eau filtrée, 3 fr. 75, non compris l'intérêt du capital de premier établissement. A Southwarck, ce prix de revient n'est que de 2 fr. 75.

Filtre de Dunkerque. — M. Pauwels, conducteur des ponts et chaussées, a, dans une brochure récente, rendu compte de la construction du filtre établi pour la distribution d'eau de Dunkerque.

Le volume d'eau à filtrer s'élevant à 1,500 mètres cubes par vingt-quatre heures, comme on peut compter sur un débit de 4 mètres cubes par mètre carré de filtre, il faut pouvoir disposer d'une surface filtrante de 375 mètres carrés.

On a créé quatre compartiments de filtrage de 125 mètres chacun, de sorte que l'un de ces compartiments est toujours en chômage et soumis à l'opération du nettoyage, pendant que les trois autres fonctionnent.

Le système adopté est analogue à celui de Paisley, précédemment décrit; M. Pauwels, conformément aux indications de Darcy, a seulement diminué l'épaisseur des couches filtrantes, ce qui est sans inconvénient, puisque l'activité du filtre ne se manifeste que sur les couches supérieures, c'est-à-dire sur une faible partie de la hauteur.

Le projet primitif comportait :

1° Une couche support.	Briques de champ	0m,12	0m,30
	Tuiles plates perforées	0m,03	
	Gravier	0m,15	
2° Une couche filtrante en sable			0m,20
		Total	0m,50

Mais le sable était entraîné en partie dans les interstices du gravier, ce qui amenait l'obstruction des cavités inférieures et paralysait le fonctionnement du filtre.

En exécution, voici ce qui a été réalisé :

1° Couche support.	Briques de champ		0m,13	0m,46
	Carreaux perforés en ciment de Portland.		0m,03	
	Galets de Calais		0m,15	
	Escarbilles de moyenne gross., lavées	0m,05	0m,15	
	— fines —	0m,05		
	— très-fines —	0m,05		
2° Couche filtrante. — Sable des dunes				0m,20
			Total	0m,66

Ce système a donné un produit exceptionnel de 8 mètres cubes d'eau environ par mètre carré de surface et par 12 heures de fonctionnement.

Les briques sont posées de champ sur le radier, elles laissent entre elles 0m,03 de distance libre.

Les carreaux de ciment, de 0m,27 de côté sur 0m,03 de hauteur, portent chacun 515 trous de 0m,0025 de diamètre.

La charge d'eau sur la surface libre du filtre est d'environ 2m,50 ; une charge de 0m,40 à 0m,80 étant suffisante, on peut laisser les eaux s'élever dans le puisard à 1m,50 au moins au-dessus du radier du filtre. Il faut remarquer, du reste, que si l'on conservait la pression de 2m,50, elle serait trop considérable et finirait par nuire au débit du filtre en comprimant les matières filtrantes.

Pour le nettoiement d'un des bassins de filtrage, on ferme les vannes d'amenée et d'écoulement ; les eaux du canal sont introduites sous le filtre par une vanne spéciale communiquant avec un aqueduc d'amenée, elles traversent le filtre de bas en haut, enlèvent les impuretés et les eaux troubles s'écoulent par un déversoir de superficie.

Cette opération se renouvelle une fois par mois; le sable est remplacé deux fois par an sur une épaisseur de deux centimètres.

Nous aurons l'occasion plus loin de parler de cette distribution d'eau de Dunkerque et de la dépense qu'elle a occasionnée.

Filtres de Berlin. — La ville de Berlin est alimentée par les eaux de la Sprée, que des machines à vapeur et des pompes élèvent jusque dans des bassins de filtrage.

Un bassin de filtration repose sur une couche d'argile battue : le fond en est formé par une couche de béton de ciment de 0m,15; les eaux filtrées tombent sur ce fond qui présente une rigole centrale où les eaux s'accumulent pour s'écouler au dehors.

L'épaisseur des couches filtrantes est de 1m,40; on trouve à la surface du sable moyen, puis viennent des graviers grossiers, des cailloux de la grosseur du poing et des pierres qui entourent les collecteurs.

Cette installation est due à l'ingénieur Crampton.

Filtres à grand débit. — Pour obtenir des filtres à grand débit, tout en conservant les couches filtrantes horizontales, le plus simple moyen est d'augmenter la charge effective sur la surface du filtre. Mais il y a inconvénient à

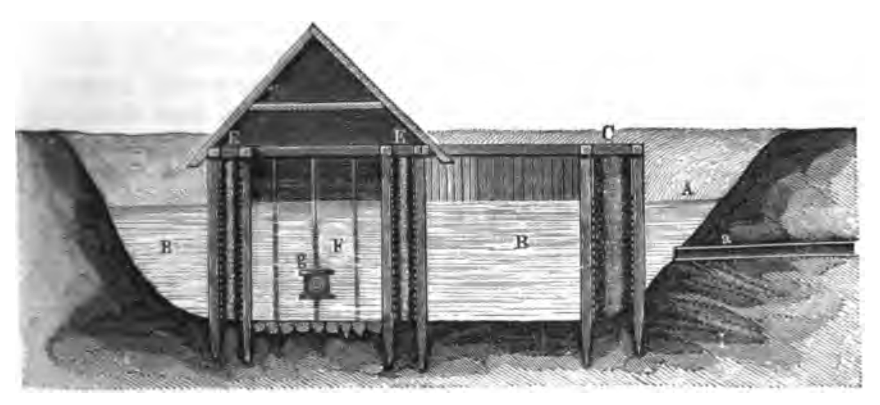


Fig. 18.

agir ainsi lorsque les matières filtrantes sont compressibles, parce qu'alors les pores se trouvent obstruées et on obtient un effet contraire à celui qu'on cherchait.

Le filtre Maurros, formé par du sable comprimé entre deux plaques de fonte

percées de trous, arrivait à donner un débit de 75 mètres cubes par mètre carré et par 24 heures sous une charge de 3^{m},80. Mais ce filtre était d'un prix élevé, difficile à nettoyer et à entretenir et on l'a abandonné.

Filtres à couches de sable verticales. — On est arrivé à établir des filtres de grand débit en se servant de couches filtrantes verticales, disposées comme le montre la figure 18, extraite de la chimie de Knapp.

L'eau arrive par la conduite *a*, remplit le premier bassin A, passe dans le bassin intérieur B en traversant un filtre vertical C, traverse un second filtre vertical E pour se rendre dans un second bassin intérieur, d'où l'extrait la pompe *g*.

Les couches filtrantes sont construites comme des batardeaux, le massif intérieur comprend un noyau central en sable maintenu sur les deux côtés par du gravier; le sable ne peut être mis en contact avec les parois, parce qu'il s'écoulerait par les interstices.

L'épaisseur du premier batardeau C est de 0^{m},80 et celle du second 0^{m},50. Un filtre de ce genre peut arriver à donner 10 mètres cubes d'eau clarifiée par mètre carré et par jour.

FILTRES NATURELS

Les filtres naturels consistent dans l'établissement de galeries perméables au milieu des alluvions de la rivière ou du fleuve dont on veut clarifier les eaux. Ces galeries, que l'on prolonge suffisamment pour obtenir la quantité d'eau voulue, versent leur produit dans le puisard des machines, d'où les eaux sont extraites par des pompes.

La théorie de ces filtres est très-simple et leur succès assuré, lorsque toutefois les alluvions ne sont pas vaseuses et que la vitesse du liquide dans le lit naturel est assez grande pour enlever les troubles qui se déposent sur les parois du lit, ou même pour renouveler la couche de sable. On a vu, en effet, dans les filtres artificiels, que les dépôts restaient toujours à la superficie.

Filtre naturel de Nottingham. — Au bord de la rivière de Trent, à 1,600 mètres de Nottingham, a été creusé, dans un grand dépôt de sable, un vaste réservoir dont les murs de revêtement sont en pierres sèches. La distance entre la paroi la plus rapprochée et la rivière est de 45 mètres. L'eau, traversant cette couche, arrive parfaitement pure au réservoir, en passant par les joints sans mortier des murs de revêtement. Ce réservoir n'étant pas voûté est soumis à l'influence des rayons solaires; aussi la végétation et la vie animale s'y développent-elles parfois en été. Dans cette saison, un nettoiement a lieu toutes les trois semaines et en hiver une fois tous les deux mois environ : on y procède en pompant l'eau hors du réservoir et en balayant le fond et les côtés de cet ouvrage.

Filtres de Toulouse. — Les filtres de Toulouse, décrits par d'Aubuisson dans son *Histoire de l'établissement des fontaines à Toulouse*, sont établis dans un banc d'alluvion que la Garonne a déposé au pied du cours Dillon (fig. 2, pl. 5 et 6) et qui est principalement composé de gravier et de sable, entremêlés souvent de cailloux et en quelques endroits d'un limon vaseux.

Le premier filtre se composait d'un fossé accédant à une excavation creusée

dans le massif d'alluvion, de 108 mètres de long sur 10 mètres de large, mise à l'abri des inondations par une forte digue qui l'entourait de toutes parts. Le filtre étant laissé à découvert, il s'y développa bientôt des végétations de toutes natures; des reptiles mêmes y parurent, de sorte que l'eau devint infecte. D'Aubuisson fit alors nettoyer le fond du filtre, on le combla ensuite avec des cailloux, en établissant dans la longueur de l'excavation un petit aqueduc en briques simplement superposées sans mortier.

Sur le massif de remplissage en cailloux et graviers on plaça de la terre franche et on sema du gazon. Ainsi rétabli, le filtre donna des eaux limpides d'une saveur agréable, vives et fraîches comme des eaux de montagne.

Ce premier filtre ne fournissant que 100 pouces d'eau, au lieu de 200 qu'il fallait, on en établit un second; mais, comme on voulait augmenter le produit, on se rapprocha trop de la rivière, on traversa une bande de terrain vaseux, on n'obtint que de l'eau chaude en été, qui développa dans les conduites une végétation de petites plantes chevelues. Les eaux du second filtre, mélangées à celles du premier, en amoindrissaient la qualité.

Aussi dut-on recourir à un troisième filtre, rendu nécessaire, du reste, par l'accroissement de la consommation. On établit la galerie *efghi* de 250 mètres de long, parallèle au bord de la rivière, à une distance de 30 mètres d'abord et de 50 mètres ensuite. Le fond en est à $1^m,14$ au-dessous des basses eaux de la rivière; sur ce fond on a établi (fig. 6, pl. 2) une galerie de $1^m,50$ sur $0^m,60$, consistant en deux murs de briques simplement superposées, recouverts en dalles de pierre. L'espace compris entre la galerie et les parois de l'excavation est rempli de gros cailloux bien lavés; au-dessus on répand une couche de gravier de $0^m,66$ de hauteur, puis on comble avec de la terre sablonneuse extraite de la fouille et on sème du gazon à la superficie.

Lorsque la Garonne déborde, l'afflux des eaux dans les filtres se fait sans doute de haut en bas, et les eaux qu'on recueille restent louches.

Galeries filtrantes de Lyon — On trouvera la description complète des galeries filtrantes de Lyon dans l'ouvrage de M. l'ingénieur Dumont.

La première galerie de filtration est en béton, fait avec du ciment de Pouilly; le radier est en gravier et sable naturel, établi à 3 mètres au-dessous de l'étiage du Rhône. La longueur de la galerie est de 150 mètres, sa largeur dans œuvre de 5 mètres. Elle a coûté 1,200 francs par mètre courant.

La galerie étant insuffisante, on lui a accolé un bassin filtrant de 44 mètres sur 38 mètres, couvert par une série de voûtes d'arêtes en maçonnerie de moellons supportées par des piliers en même maçonnerie et par des culées fondées seulement au niveau de l'étiage.

La surface filtrante totale du bassin et de la galerie était de 2,200 mètres carrés: on pensait qu'elle suffirait à fournir 20,000 mètres cubes par 24 heures. Mais ces prévisions furent trompées, et, lorsque le Rhône descendait à l'étiage, le débit des filtres tombait à 10,000 mètres cubes, on dut établir un second bassin filtrant présentant une surface de filtration de 2,168 mètres carrés. Grâce à ce bassin, on peut se dispenser de marcher, en temps d'étiage, avec une dénivellation supérieure à 2 mètres entre le niveau du Rhône et le niveau de l'eau dans le filtre : une dénivellation plus forte a l'inconvénient de changer le régime des machines et est dangereuse pour la solidité des parois d'enceinte, en même temps que le filtrage est moins parfait.

Le prix de la filtration d'un mètre cube d'eau dans les galeries filtrantes de Lyon revient à 0 fr. 007.

Les filtres projetés par M. Dumont pour une distribution d'eau de Seine dans la ville de Paris se composaient de voûtes en berceau, de 5 mètres d'ouverture, surbaissées au dixième, de 6^{m},50 de rayon, construites en briques creuses ; les ouvertures des briques permettaient à l'eau de passer librement dans le réservoir formé par les voûtes. Ces voûtes, en briques creuses, devaient supporter un filtre artificiel composé comme il suit :

Sable fin	0^{m},30
Sable moyen.	0^{m},08
Gros sable	0^{m},10
Petit gravier	0^{m},10
Pierres concassées passant dans un anneau de 0^{m},06	0^{m},12
Total.	0^{m},70

Galeries filtrantes des eaux de Nîmes. — Les eaux qui alimentent la ville de Nimes ont été prises sur les bords du Rhône dans une galerie filtrante de 500 mètres de longueur ; c'est une voûte en arc de cercle de 5^{m},75 de rayon, de 11 mètres d'ouverture, de 0^{m},60 d'épaisseur à la clef et de 1^{m},40 d'épaisseur aux naissances. Les culées, de 3 mètres d'épaisseur, sont fondées sur le sable, au niveau de l'étiage, et présentent à 1 mètre au-dessus de l'étiage une retraite de 0^{m},50.

Le radier en sable a son point le plus bas à 2 mètres au-dessous de l'étiage.

Le profil en travers de ce radier se compose d'une demi-ellipse de 8 mètres de grand axe horizontal et de 3 mètres de demi petit axe; elle est bordée de deux berges en gravier de 1 mètre de large que prolonge la base des culées.

La surface filtrante de la galerie est de 5,500 mètres carrés.

« En l'état ordinaire des choses, dit M. l'ingénieur Dumont, il n'existe aucune communication directe entre le Rhône et l'intérieur de la galerie.

Les eaux n'arrivent donc dans cette galerie que par filtration à travers la masse de graviers dans lesquels elle est creusée.

Lorsque les machines fonctionnent, les faits suivants se produisent :

Les eaux s'abaissent d'abord dans les puisards étanches des machines ; il s'établit un courant des galeries de filtration et d'amenée à ces puisards. Le niveau des eaux baisse dans la galerie de filtration ; il se crée alors une pression du Rhône à l'intérieur de la galerie. Cette pression donne naissance à une filtration à travers les couches de gravier et les eaux claires affluent dans la galerie par tous les points du radier ; en un mot, il s'établit sur toute la surface de ce radier des sources artificielles.

Lorsque l'équilibre s'est établi entre l'aspiration des machines et le produit de ces sources artificielles de la galerie, le niveau de cette dernière reste constant.

Le produit de la filtration dépend d'ailleurs de trois coefficients :

1° La surface du radier filtrant;

2° La différence de niveau entre les eaux du Rhône et celles de la galerie, différence qui est produite par l'aspiration des machines ;

3° Enfin la hauteur des eaux du Rhône au-dessus de l'étiage.

Pour que ce travail de filtration présente d'ailleurs une permanence et un état satisfaisants, il doit remplir certaines conditions. Il faut :

1° Que la vitesse avec laquelle les eaux affluent dans la galerie par son radier ne soit pas assez forte pour provoquer des affouillements sous les culées, qui auraient pour effet d'entraîner les sables et les graviers ;

2° Qu'aucune filtration n'ait lieu dans le radier des puisards des machines ni dans celui de la galerie d'amenée, car une telle filtration pourrait à la longue compromettre la solidité des massifs qui supportent les machines et les pompes. »

L'expérience de Lyon a montré que le produit des galeries filtrantes devait être limité à 5 ou 6 mètres cubes par mètre carré et par heure.

« Aussitôt que le fleuve croît de quelques centimètres au-dessus de l'étiage, le produit de la filtration augmente dans une proportion énorme et, au bout de quelques instants, les machines deviennent impuissantes à provoquer le moindre abaissement dans le niveau de l'eau de la galerie.

A l'égard du nettoyage de ce filtre naturel, il faut d'ailleurs remarquer que les troubles, dont les eaux du Rhône sont chargées, se déposent sur la première couche de gravier, qui tapisse son lit, sur une épaisseur de $0^m,20$ à $0^m,30$ seulement, et, comme cette couche est sans cesse renouvelée et enlevée dans les crues du fleuve, il en résulte que ce dernier se charge de nettoyer ce filtre naturel et d'assurer ainsi sa permanence.

La galerie de filtration des eaux de Nîmes est revenue à 600 francs le mètre courant.

Comparaison des distributions d'eaux filtrées et des distributions de sources dérivées. — En traitant des qualités d'une eau potable, nous avons déjà comparé, au point de vue de la salubrité et de la limpidité, les eaux de rivières filtrées et les eaux de sources, et nous avons dit les raisons pour lesquelles on avait préféré alimenter Paris avec des eaux de sources dérivées à grands frais plutôt que de recourir à des eaux de Seine élevées par des machines après clarification.

M. Aristide Dumont, ingénieur en chef des ponts et chaussées, qui a établi des distributions d'eau filtrée à Lyon et à Nîmes, s'est montré le principal champion du système qui consistait en l'élévation des eaux de Seine filtrées.

Suivant lui, les dérivations des sources ne peuvent donner à la Ville de Paris que 200 litres d'eau par habitant et par jour, quantité qui deviendra rapidement insuffisante ; avec les machines, il est toujours facile de proportionner les produits aux besoins de la population ; les sources ont un débit essentiellement variable, qui diminue en été, c'est-à-dire précisément aux époques où la consommation augmente ; le prix d'un mètre cube d'eau de source dérivée est environ le double de celui d'un mètre cube d'eau de rivière filtrée et élevée par machines ; le prix d'un mètre cube d'eau de Seine, filtrée et élevée à 90 mètres de hauteur, ne serait que de $0^{fr},024$, soit par année, pour la fourniture journalière d'un mètre cube, une somme ronde de 9 francs.

Opinion de M. Belgrand sur la filtration. — M. Belgrand a fait triompher le système de la dérivation des eaux de source. Nous avons dit plus haut qu'il considérait les eaux de source comme seules potables à l'état naturel, et qu'il estimait que jusqu'à présent on n'avait pas trouvé de procédé pour ramener les eaux de rivière à un état irréprochable.

Nous trouvons dans les Études hydrologiques de l'éminent directeur des eaux de Paris les observations suivantes :

Il résulte d'expériences faites, pendant 423 jours consécutifs, que l'eau de Marne renferme en moyenne $56^{gr},13$ de matières solides par mètre cube ; cette eau a été claire pendant 161 jours, louche pendant 205 jours et trouble pendant 57 jours ;

Il résulte d'expériences faites, pendant 1039 jours, que l'eau de Seine ren

ferme en moyenne 24^{gr},05 de matières solides par mètre cube; cette eau a été claire pendant 646 jours, louche 286 jours et trouble pendant 107 jours.

En somme, les dépôts annuels dans les bassins de filtration n'atteindraient avec l'eau de Seine que 9^{kg},66 par mètre cube, distribué journellement, et avec l'eau de Marne 19^{kg},84 ; il n'en résulterait pas des dépôts très-encombrants, ni difficiles à enlever, et l'opération est parfaitement possible sous ce rapport.

M. Belgrand, d'après ses expériences, estime que presque toute l'eau fournie par les galeries filtrantes, voisines des rivières et ouvertes dans les alluvions, provient, non de la rivière elle-même, mais des nappes souterraines. En effet :

A Lyon, l'eau puisée dans le Rhône marquant à l'hydrotimètre..	16°
— celle de la galerie filtrante marquait..........	18°
— et celle d'un puits du voisinage............	23°,77
A Toulouse, l'eau de la Garonne marquant..........	13°,5
— celle de la galerie de filtration marquant.....	16°
A Fontainebleau, l'eau de la Seine marquant..........	16°,73
— celle de la galerie marquait.........	21°,2
A Nevers, l'eau de la Loire marquant.,......	7°
— celle donnée par la machine marquait........	24°

A Blois, une galerie filtrante, établie dans le lit même du fleuve, donnait une eau marquant 14°, tandis que le degré du fleuve était de 7°.

M. Belgrand a fait ouvrir un puits dans les graviers de la plaine d'Issy, près Paris ; l'eau, qu'il fournissait, après un long épuisement continu, était à la température de 12°, tandis que celle de la Seine était à 7°,5; le titre hydrométrique de l'eau du puits atteignait 45°, celui de l'eau de Seine n'étant que de 20°. L'eau du puits dont il s'agit était évidemment très-dure et impropre aux usages domestiques.

Du reste, ce fait est remarqué, depuis bien longtemps, en beaucoup de points de la vallée de Seine; nous connaissons des puits ouverts dans les graviers d'alluvions de la vallée, à 200 mètres du fleuve, qui ne donnent qu'une eau dure; on est forcé d'aller chercher à la Seine les eaux destinées à la cuisson des légumes.

C'est une erreur aussi d'admettre que le produit d'une galerie filtrante est proportionnel à sa surface ; cette erreur est généralement commise. Sans doute, le débit augmente avec la dimension de la galerie, mais l'augmentation de l'un n'est pas aussi rapide que celle de l'autre; il en est de même, du reste, pour les puits, on n'en augmente pas sensiblement le débit en accroissant le diamètre, dès qu'il atteint une certaine valeur ; nous reviendrons du reste sur ce point.

Ainsi, les eaux qui arrivent dans les galeries filtrantes, proviennent surtout des nappes souterraines et diffèrent, quelquefois, beaucoup de celles de la rivière ; la qualité de celles-ci ne peut donc pas permettre de préjuger la qualité de celles-là.

« Ces résultats, dit M. Belgrand, permettent d'expliquer la persistance du filtrage dans ces galeries. On sait que les filtres artificiels s'engorgent avec une grande rapidité; à Paris, notamment, on est obligé, dans certaines saisons, de nettoyer tous les jours ceux des fontaines marchandes; même lorsque l'eau de Seine est claire, de fréquents nettoyages sont encore nécessaires. »

On se demandait comment les galeries filtrantes de Lyon et de Toulouse continuaient à fonctionner, depuis si longtemps, sans aucune espèce de nettoyage.

On cherchait à expliquer le fait en disant que le fleuve, en déplaçant les sables qui tapissent son lit, renouvelait la partie réellement utile du filtre; mais, s'il en était ainsi, lorsque le fleuve opère le nettoiement de ce filtre naturel en remuant les graviers qui en forment la superficie, les matières en suspension, entraînées par l'eau même qui se filtre, pénétreraient plus profondément dans la masse de ces graviers et en oblitéreraient rapidement et d'une manière irrémédiable tous les petits canaux. Le filtre deviendrait promptement imperméable. Cette explication n'est pas admissible.

« En admettant, au contraire, que les galeries filtrantes soient alimentées surtout par les nappes souterraines, on s'explique très-bien la persistance de leur action, puisqu'elles ne reçoivent que des eaux naturellement limpides.

« Ce moyen de se procurer de l'eau de source peut être mis en pratique, avec avantage, dans les plages de gravier des grandes vallées, des terrains crétacés du bassin de la Seine. Dans les autres terrains, l'eau de rivière doit être filtrée artificiellement. »

Ce qui corrobore l'opinion de M. Belgrand sur la provenance des eaux des galeries filtrantes, c'est ce fait que nous avons signalé aux galeries de Toulouse, que les eaux deviennent troubles quand la Garonne déborde ; les eaux du fleuve, s'épanchant à la surface, n'ont alors que quelques mètres à franchir pour pénétrer dans les galeries; elles les envahissent et se mélangent au produit des nappes souterraines.

Conclusion sur les filtres. — En ce qui touche les filtres artificiels, même ces grands filtres anglais de Chelsea si bien installés, « aucun de ces appareils, dit M. Belgrand, ne donne une solution satisfaisante. Tous laissent passer l'urine et d'autres produits azotés de la nature la plus répugnante. »

Le procédé anglais de Chelsea ne réussit, du reste, qu'avec des eaux louches plutôt que troubles; à Marseille, avec les eaux limoneuses de la Durance, le filtre anglais n'a donné que de médiocres résultats.

D'une manière générale, les filtres peuvent arriver à fournir une eau limpide, mais jamais ils ne donnent une eau agréable à boire; souvent même, l'eau filtrée a perdu de sa salubrité, parce qu'elle s'est dépouillée des gaz qu'elle contenait.

L'usage du filtre doit donc être évité autant que possible.

PETITS FILTRES EN USAGE DANS L'ÉCONOMIE DOMESTIQUE

Nous ne parlerons point de la clarification des eaux par le procédé chimique, nous réservant de traiter ce point lorsque nous aborderons la question de l'utilisation des eaux d'égout, et nous nous contenterons de décrire sommairement les principaux filtres en usage.

Filtre en grès. — Le plus connu est le filtre en grès. Dans une fontaine, généralement en terre cuite, on dispose une cloison horizontale formée d'une dalle mince d'un grès quartzeux, qui présente une grande porosité avec un grain homogène. Les raccords de la cloison et des parois de la fontaine sont soigneusement exécutés en ciment. On remplit la fontaine; l'eau, sous l'influence de la charge, traverse la paroi de grès et se rend dans un compartiment inférieur, d'où elle s'écoule à volonté par un robinet.

Ce filtre en grès ne conviendrait point pour des eaux très-sales; il demande, du reste, à être nettoyé et entretenu avec soin.

Les Anglais se servent d'une cloche en grès renversée dans une cuve cylindrique en tôle; l'eau des conduites arrive sous pression, remplit la cuve, traverse la cloche en grès, et s'accumule à l'intérieur de cette cloche, d'où on l'extrait par un robinet. Une pression de 3 mètres est nécessaire pour une bonne filtration.

Filtres ordinaires avec sable de rivière, charbon ou éponges. — Genieys a donné, dans son *Mémoire* sur la clarification et la dépuration des eaux, la description des trois filtres représentés par les figures suivantes :



Fig. 19.

1° La figure 19 représente le filtre à double courant, proposé à la marine, par M. Zeni. C'est un tonneau à doubles parois latérales ; le tronc de cône intérieur a même fond que le tronc de cône extérieur, mais est percé à sa base de trous et d'échancrures, qui permettent à l'eau de passer du tonneau central dans l'espace annulaire qui l'entoure.

Au fond du tonneau central, nous trouvons d'abord une couche de sable fin de rivière; au-dessus est un mélange de sable fin et de poussière de charbon en parties égales, le tout bien battu ; vient ensuite une couche de sable fin de rivière, puis une couche de charbon en poudre que l'on remplace par du gros sable, si l'eau n'est pas infecte.

Au fond de la partie annulaire est une première assise de sable de rivière, surmontée d'une assise de charbon en poudre.

L'eau est versée au sommet du tonneau central sur une cloison horizontale percée de trous, qui arrête les plus grosses impuretés ; elle traverse de haut en bas les couches filtrantes, passe dans l'espace annulaire dont elle traverse les couches filtrantes de bas en haut, et s'écoule par un robinet.

L'eau obtenue par un mouvement ascensionnel a nécessairement abandonné tous les petits corps pesants qui auraient échappé à la filtration.

Elle parcourt un chemin double à travers les matières filtrantes et par conséquent s'épure davantage.

On peut nettoyer le filtre sans le défaire en établissant seulement un courant en sens inverse du premier, ce qui est facile à réaliser au moyen de deux robinets : pendant que le courant existe, on remue le sable du tonneau.

On ne devra introduire dans ce filtre du charbon de bois ou du charbon animal que si les eaux sont infectes ; s'il s'agit simplement d'eaux troubles, le sable suffit.

2° La figure 20 représente l'ancien filtre marin, qui se compose d'un seau de clapotage *a*, dans lequel on verse l'eau à filtrer ; il est muni d'un couvercle afin que l'eau ne s'échappe point par le roulis.

Le liquide passe par le fond du seau dans le premier réservoir *b* d'où il descend par le tube *d* dans le réservoir inférieur *c* ; sous l'influence de la pression il tend à remonter au niveau du réservoir *b*, il a donc la force nécessaire pour traverser les couches filtrantes *g* comprises entre deux cloisons horizontales per-

cées de trous. L'eau arrive donc dans le réservoir *k* d'où on l'extrait par le robinet *n*; le robinet *m* sert à la vidange et au nettoyage de l'appareil.

L'air se comprimerait dans le compartiment *k* et empêcherait cette cavité de se remplir, si par un tube en plomb on ne la mettait en communication avec



Fig. 20.


Fig. 21.

l'extérieur; le tube en plomb doit s'élever au-dessus de l'appareil, afin que la colonne piézométrique ne puisse s'en échapper.

3° Les figures 21 et 22, données par Genieys, représentent un tonneau filtrant : c'est un tonneau en chêne, cerclé de fer et muni de poignées; on verse l'eau à la partie supérieure, elle traverse les champignons à éponges *a* et pénètre dans le second compartiment où elle trouve soit des couches de sable pur, soit des couches alternées de sable et de charbon, elle traverse une paroi horizontale percée de trous et se rend dans la capacité inférieure, d'où on l'extrait par un robinet.

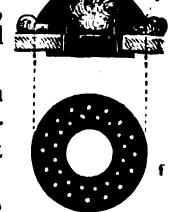


Fig. 22.

La figure 22 donne le détail d'un champignon à éponge; la partie annulaire horizontale qui termine le champignon pardessous est percée de trous qui livrent passage à l'eau; avant comme après ces trous, l'eau doit en outre traverser une éponge.

Filtres Fonvielle. — Le filtre Fonvielle a été en grand usage pour l'épuration des eaux troubles. Il se compose de quatre couches filtrantes, séparées par des vides, et étagées dans une cuve de 3m,50 de haut. Chaque couche filtrante, formée de sable et de gravier, était intercalée entre deux feuilles de cuivre percées de trous. Le long de la cuve s'élevaient deux tubes verticaux mis en communication par des robinets avec tous les compartiments; de sorte que, suivant le degré d'impureté de l'eau, on lui faisait traverser un nombre variable de couches filtrantes.

Les filtres s'oblitéraient rapidement, et il fallait enlever les couches sableuses pour les laver; on en remplaça quelques-unes par des couches d'éponge, qui enlevaient d'abord les plus grosses impuretés de l'eau.

Le nettoyage des éponges est bien plus facile que celui du sable, mais il doit être fréquemment renouvelé, et le procédé ne laisse point que d'être assez coûteux.

En somme, le filtre Fonvielle ne s'est pas propagé autant qu'on l'aurait cru; il réalisait cependant un grand perfectionnement; les filtres ordinaires en pierre poreuse sont, en effet, insuffisants pour les besoins d'un établissement de quelque importance.

Avec les filtres Fonvielle, on obtient un débit considérable qui augmente avec la pression. Le filtre de l'Hôtel-Dieu, qui n'avait pas un mètre carré de section horizontale, donnait par jour, sous une charge de $\frac{7}{4}$ d'atmosphère, un débit de 50,000 litres au moins d'eau pure. C'est, comme on le voit, un résultat des plus utiles.

Filtres en laine. — Les filtres fabriqués avec la tontisse de laine, c'est-à-dire avec le produit de la tonte des draps, ont donné de meilleurs résultats.

A $0^m,10$ au-dessus du fond du réservoir on fixe un cadre horizontal portant une toile métallique à mailles serrées, sur laquelle on applique une feuille de feutre que l'on relève sur les bords; on fait arriver de l'eau sur le feutre et on ajoute la laine tontisse dont les flocons se tassent et qu'on étale uniformément. On fait couler l'eau et l'on ajoute de la laine jusqu'à obtenir une couche de $0^m,05$.

Sur la couche de laine on pose un second châssis métallique semblable au premier, on comprime le tout et on bouche avec du feutre les interstices qui pourraient rester libres sur les bords du châssis.

Au-dessus de cette première couche de laine, on en dispose une seconde de la même manière, puis une troisième et une quatrième.

L'ensemble des couches est recouvert par un cadre que l'on serre au moyen de vis de pression.

La couche supérieure ne tarde pas à s'engorger par la vase et le débit de l'appareil diminue; on commence par enlever la première assise de laine, puis on fonctionne quelque temps avec les trois autres; ensuite on enlève la seconde et on fonctionne avec les deux qui restent.

Le débourbage de la laine s'effectue par un lavage méthodique dans plusieurs caisses pleines d'eau dont la pureté va en augmentant. Les flocons de laine doivent être agités énergiquement avec des espèces de patouillets.

Les filtres en tontisse de laine fonctionnent bien sous d'assez fortes pressions. Ils peuvent donner 60 à 180 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures.

L'emploi de la laine comme matière filtrante n'est du reste pas moderne; D'après Strabon, on se servait en Asie de peaux de mouton pour filtrer l'eau.

Des filtres à l'Exposition de 1867. — Dans son rapport sur les distributions d'eau à l'Exposition universelle de 1867, M. l'ingénieur Huet présente les observations suivantes :

Les difficultés que présente le problème du filtrage des eaux de rivière sur une grande échelle n'ont pas été surmontées, et la question en est toujours au même point.

Les filtres naturels, auxquels la situation de certaines villes permet de recourir, donnent généralement de bons résultats. On augmente ceux de Toulouse en prolongeant les galeries ouvertes dans les graviers d'atterrissement de la Garonne. A Vienne, les galeries creusées auprès du fleuve, à $2^m,50$ seulement au-dessous de son niveau ordinaire, ne donnant pas un assez fort débit lors des basses eaux, on a établi à 200 mètres du fleuve et à 5 mètres en contrebas de son niveau moyen, une galerie en maçonnerie de 450 mètres de longueur; elle

fournit une eau très-agréable à boire, mais qui ne paraît pas provenir du Danube; cette eau appartient sans doute à la nappe souterraine.

A Londres, on s'en tient toujours à l'ancien filtre en gravier, d'environ $1^m,50$ d'épaisseur, qui, sous une charge de $1^m,50$ à 2 mètres d'eau, fournit un débit de 6 à 8 mètres cubes par mètre carré et par vingt-quatre heures; le développement des bassins filtrants de Londres atteint une superficie d'environ 19 hectares.

A Paris, où, à proprement parler, aucun système de filtrage en grand n'est appliqué, le filtre Vedel-Bernard, à haute pression, est celui qui sert d'une manière générale à la clarification des eaux vendues dans les fontaines marchandes de la ville.

C'est un cylindre en tôle, hermétiquement clos, dans lequel sont placées des couches successives de déchets d'éponge ou de laine préparée au tannate de fer, de grès, de charbon, de gravier; l'eau, qui arrive en pression à la partie supérieure, sort dans les mêmes conditions à la partie inférieure après avoir traversé ces couches de matières filtrantes et désinfectantes. Sous une charge de 15 mètres, 1 mètre carré de surface filtrante donne 190 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures. Ce filtre se nettoie par le lavage des éponges et de la laine.

Dans les habitations, nous avons toujours pour la fontaine de ménage le filtre en pierre; cependant, quelques appareils nouveaux qui tendent à s'y substituer méritent d'appeler l'attention.

Le principe essentiel du *filtre Bourgoise* est le feutre fortement comprimé, rendu imputrescible par une préparation de cachou et maintenu entre deux grilles métalliques galvanisées; ce filtre affecte diverses formes suivant l'usage auquel on le destine : filtre de poche, filtre à siphon, filtre de ménage; il a un débit beaucoup plus considérable que le filtre de pierre et se nettoie facilement par le renversement du courant; il se complète avec avantage par l'addition d'une couche de charbon superposée au filtre proprement dit, indépendante de ce filtre et facilement renouvelable.

Dans le *filtre Burcq*, on revient au filtre de pierre, écartant les matières filtrantes organiques, soit végétales, soit animales, qui ne peuvent jamais être employées sans inconvénient à la filtration d'une eau destinée à l'alimentation. On obtient d'ailleurs une filtration plus rapide qu'avec les filtres ordinaires, en raison de la nature de la pierre artificielle dont le filtre Burcq est formé; cette pierre, fabriquée avec la terre à poterie de grès, est rendue plus ou moins poreuse suivant la nature du liquide à filtrer, par un mélange de sciure de bois ou de toute autre matière analogue qui se brûle à la cuisson de la terre. Ce filtre se prête comme le filtre Bourgoise aux diverses formes de filtre de poche, filtre à siphon, filtre de ménage. Il se nettoie aussi par le renversement du courant et, au besoin, par l'action d'une brosse à la surface extérieure.

Moyen d'éviter le mélange des eaux courantes au confluent de deux cours d'eau. — Lorsque deux cours d'eau se rencontrent ou lorsqu'une source naît dans un cours d'eau, il arrive souvent que l'une des eaux est claire et l'autre trouble; il peut y avoir grand avantage à empêcher le mélange afin de recueillir l'eau claire.

A cet effet, M. Belgrand a indiqué un moyen simple, qui lui paraît susceptible de nombreuses applications.

« Il suffit, dit-il, d'entourer le débouché du petit cours d'eau d'une cloison grossière, non étanche. En laissant les eaux du ruisseau s'écouler librement par les vides de la cloison, l'eau de la rivière ne pourra entrer, même en temps de

crue, dans le petit bassin formé autour du confluent; car l'eau du ruisseau, en s'écoulant par les vides de la cloison, subit une perte de charge; son niveau est donc plus élevé à l'intérieur qu'à l'extérieur du bassin, et l'eau extérieure n'y peut rentrer. La cloison détruit d'ailleurs les tourbillonnements et le batillage de l'eau. Si l'on veut détourner complétement le petit ruisseau et empêcher tout mélange de son eau avec celle de la rivière à l'extérieur du bassin, la cloison non étanche est encore suffisante; car, par l'effet de la dérivation du petit ruisseau, une partie de l'eau de la rivière est appelée dans le bassin; elle subit une perte de charge en traversant la cloison; il en résulte une dénivellation de l'extérieur à l'intérieur du bassin, et pas une goutte d'eau du ruisseau ne peut sortir par les vides de la cloison. »

Par ce procédé simple, M. Belgrand a pu capter une source voisine de l'usine de Saint-Maur, source dont les eaux limpides disparaissaient à la moindre crue sous les eaux boueuses de la Marne.

CHAPITRE III

SOURCES ET PUITS

1° SOURCES NATURELLES ET SOURCES ARTIFICIELLES

Origine des sources[1]. — Lorsqu'une eau souterraine vient à paraître au jour et à couler sur le sol, elle constitue une source.

Les sources sont le produit de l'infiltration des eaux pluviales.

Les philosophes anciens donnaient aux sources une autre origine.

Les eaux des fontaines, des rivières et des fleuves se jettent dans la mer, disaient-ils, et son niveau ne varie pas! Quelle est donc la loi mystérieuse qui la règle? Car, à ne considérer que le volume des eaux versées depuis tant de siècles dans ce gouffre immense, la terre entière devrait être recouverte par un nouveau déluge.

Pour se rendre compte de cet invariable équilibre, ils ont imaginé que, par des conduits souterrains, la mer rendait aux fontaines, aux sources des fleuves le volume qu'elle en avait reçu; qu'il s'établissait ainsi une sorte de circulation perpétuelle entre les eaux de superficie et les eaux souterraines.

Nulle objection ne les arrêtait.

Les eaux de la mer sont salées et les eaux de fontaines sont douces.

Eh bien! les substances salines se déposaient dans le trajet des eaux.

Cette réponse ne portait-elle pas la conviction dans votre esprit, ils avaient à leur disposition un feu central qui réduisait en vapeur l'eau de ces canaux souterrains, et les produits de cette distillation immense, s'élevant des profondeurs de la terre, se condensaient à la surface et vous offraient les fontaines dégagées des éléments impurs qu'elles devaient à leur origine.

Que devenaient ces accumulations séculaires de substances salines? pourquoi n'obstruaient-elles pas les conduits? pourquoi ces immenses alambics ne se remplissaient-ils pas? pourquoi aussi cette variation périodique des fontaines dans les temps de pluie et de sécheresse, tandis qu'elles auraient dû présenter toujours un débit constant avec un réservoir tel que la mer.

Aux premières objections on répondait que la nature a des ressources infinies et que l'esprit des hommes est impuissant à les sonder. A la dernière, on avait fini par accorder que les eaux pluviales pouvaient bien exercer quelque influence dans la solution de la question qui divisait tous les esprits.

[1] Ces considérations sur l'origine des sources sont extraites en grande partie de l'ouvrage de Darcy « *les fontaines de Dijon* » ouvrage malheureusement épuisé.

Et d'ailleurs, les partisans des systèmes si dédaignés aujourd'hui n'avaient-ils pas pour eux les préjugés religieux, et, au besoin, le texte mal compris des livres sacrés?

Jadis Platon, et d'autres philosophes, indiquaient, pour le réservoir commun des sources et des fontaines, les gouffres du Tartare.

Des écrivains chrétiens ont prétendu plus tard, pour expliquer l'ascension des eaux du fond des entrailles de la terre, qu'elles n'y étaient point assujetties aux règles de l'hydrostatique.

Saint Thomas admet l'ascendant des astres ou la facilité attractive de la terre qui rassemble les eaux dans son sein par une force que la Providence lui a départie suivant ses vues et ses desseins.

Puis arrivaient enfin, pour trancher la question, des passages mal interprétés de la Bible, que l'on jetait imprudemment au milieu de discussions tout humaines.

Et, pour mieux soutenir le faux système des conduits souterrains et des alambics monstrueux, on s'étayait de ces paroles de l'Ecclésiaste, verset 7 :

« Tous les fleuves entrent dans la mer, et la mer ne regorge pas ; les fleuves retournent au même lieu d'où ils étaient sortis pour couler encore. »

Voilà donc, s'écriait-on, la preuve irrécusable de la grande circulation souterraine des eaux, circulation nécessaire, indispensable, car sans elle, la terre disparaîtrait encore sous le niveau d'une mer sans rivages. *Plures quam mille fluvii in mare se exonerant, et majores ex illis tantâ copiâ, ut aqua illa, quam per totum annum emittant in mare, superet totam tellurem.* (*Varenius*).

Cette conséquence n'est pas rassurante, mais implique-t-elle nécessairement le mode de circulation adopté par les défenseurs des canaux souterrains?

N'est-il pas possible aux eaux versées dans la mer d'en sortir d'une autre façon et sous une autre forme?

La mer n'offre-t-elle pas une prodigieuse surface à l'évaporation journalière? Ne voit-on pas que cet immense volume de vapeur, qui chaque jour s'en élève, peut égaler et dépasser même, au bout de l'année, d'une part le volume des pluies qu'elle a reçues directement, et de l'autre, le débit des fleuves?

Ces vapeurs, en devenant des nuages que les courants atmosphériques déchirent et transportent, et dont une partie finit par se résoudre en pluie sur les terres, ne peuvent-elles pas à leur tour alimenter, par infiltration, les fontaines, les rivières et les fleuves?

On connaissait l'une des moitiés de cette chaîne sans fin qui devait nécessairement unir les fontaines à la mer et la mer aux fontaines. On dérobait l'autre à nos yeux en la plaçant dans les entrailles de la terre; on peut la voir au contraire; les nuages en sont les anneaux.

Ajoutons que les variations des sources, suivant les circonstances atmosphériques, et leur épuisement vers la fin de septembre, sont la conséquence immédiate du système que nous indiquons.

Et tout s'explique aisément alors ; la purification de l'eau des mers n'exige plus pour s'opérer, comme dans le système de Descartes, que l'on imagine des feux souterrains, des alambics incommensurables ; le soleil ici sera le foyer, le bassin des mers le creuset de cette distillation immense.

Je ne donnerai point les calculs météorologiques qui ont fait passer cette théorie à l'état de vérité mathématique ; ils sont du ressort de la physique.

Une objection a été faite cependant, je crois devoir la rapporter, parce qu'elle

nous conduira sur la voie des divers moyens qui peuvent être employés pour arriver à découvrir des sources.

On a dit : les eaux pluviales ne pénètrent jamais qu'à quelques pieds dans les terres, comment pourraient-elles donc former les fontaines? *Pluvia non ultra decem pedum profunditatem humectat terram.* (*Varenius*). *Omnis humor intra primam crustam consumitur, nec in inferiora descendit.* (*Sénèque.*)

Cette assertion serait-elle vraie en ce qui concerne les terres végétales, que la théorie précitée n'en serait pas ébranlée ; car ce n'est point généralement à l'imbibition des terres à une profondeur plus ou moins grande qu'est due l'origine des sources.

On peut, en effet, partager les sources, quant à leur origine, en trois catégories principales :

1° Celles qui prennent naissance dans les terrains imperméables ; elles doivent en général offrir un faible débit et tarir aisément, car elles ne sont, à vrai dire, que l'égout superficiel de ces terrains,

Quelquefois, pourtant, les terrains imperméables se laissent traverser par des sources très-abondantes d'eau thermale qui jaillissent à travers les failles qu'une convulsion géologique a produites.

2° Lorsqu'une couche imperméable recouverte d'une formation perméable vient affleurer, soit le flanc, soit le fond d'un vallon, on comprend qu'il doit presque toujours y avoir en ce lieu production d'une source plus ou moins abondante.

Si la couche imperméable passe sous le vallon à une profondeur notable, et qu'elle soit recouverte d'une couche perméable arrivant jusqu'au fond de ce vallon, il se forme là une sorte de vase remplie d'eau, dont le niveau monte ou baisse suivant la saison. Le dégorgement de ce vase, qui donne naissance à une ou plusieurs sources, doit en général s'opérer au point le plus bas, c'est-à-dire au fond du vallon ; et toutefois de nouvelles sources, moins fortes, il est vrai, et moins constantes que les premières, peuvent surgir sur les flancs des coteaux, si des pluies abondantes relèvent assez le niveau des eaux souterraines pour amener ce résultat.

3° Il peut arriver enfin qu'une couche, perméable à son origine, soit enveloppée plus tard de formations imperméables qui lui servent de toit et de lit ; alors les eaux coulent dans l'intervalle comme dans un conduit, et l'on obtient une source artésienne naturelle si une fracture heureuse du toit permet à l'eau de s'élever à la surface. Les puits artésiens tirent, comme on le sait, leur origine du percement artificiel de la couche supérieure.

On comprend, du reste, que les eaux qui coulent entre la double enveloppe peuvent descendre à de grandes profondeurs dans un vallon, puis remonter sur le versant opposé et jaillir en source sur un point tellement élevé qu'on ne se rend point compte, au premier abord, de la manière dont cette fontaine est alimentée. Ces couches aquifères, recouvertes de leurs enveloppes marneuses, peuvent descendre dans la mer et présenter quelques fractures de leur enveloppe supérieure sur le rivage ou sous les eaux.

De là l'existence des sources d'eau douce sur les bords et jusque dans les profondeurs de l'Océan. De là aussi la possibilité d'obtenir de l'eau douce en creusant des puits sur la plage.

Les indications qui précèdent suffiront, je pense, pour démontrer le grand avantage d'abaisser le niveau des sources qui apparaissent dans les couches perméables ; car la diminution de pression qu'on opère ainsi sur le liquide a pour

double conséquence d'augmenter la vitesse du fluide qui sort du conduit naturel et de diminuer les pertes dues aux infiltrations.

C'est en vertu du même principe, mais inversement appliqué, que les ingénieurs, gênés par la rencontre d'une source dans des travaux hydrauliques, la cernent et l'emprisonnent de manière à la faire arriver à une hauteur telle que son débit soit anéanti.

C'est ainsi encore que, par suite de considérations du même ordre et pour se débarrasser des sources contre lesquelles on luttait difficilement, on a quelque fois travaillé dans les puits de mine sous l'influence artificielle de pressions plus grandes que l'atmosphère.

Si l'on vient maintenant à suivre par la pensée les canaux alimentaires des fontaines, que de ramifications les eaux qu'ils mènent n'auront-elles pas à parcourir! de cavernes grandes ou petites à remplir ! de siphons à franchir!

Et si quelques-unes de ces ramifications, de ces cavernes sont incomplètement occupées par les fluides, voilà l'air qui, tantôt par sa dilatation, tantôt par sa compression, par suite de ses variations d'élasticité dues aux changements de température, modifiera nécessairement à son tour la marche souterraine des eaux.

De là, ces singularités que les fontaines offrent parfois à l'observateur et qui, indépendamment des circonstances atmosphériques, altérent d'une façon si curieuse l'uniformité du débit.

Dans les unes, l'écoulement cesse et recommence à des périodes régulières : elles sont appelées fontaines intermittentes.

Dans les autres, l'écoulement, sans s'arrêter entièrement, croît à partir d'un certain débit minimum jusqu'à un produit maximum, pour revenir ensuite au point de départ et recommencer la même période ; ce sont les fontaines intercalaires.

Viennent ensuite les fontaines intermittentes et les fontaines intercalaires composées. Les premières éprouvent dans leur marche une série de petites intermittences, séparées par un temps d'arrêt beaucoup plus considérable. Les secondes subissent dans leur volume une succession de variations également interrompues par une variation beaucoup plus grande, qui devient la limite de la période.

A peine j'ose entrer dans quelques explications au sujet de ces fontaines.

Pour qu'il y ait production d'une fontaine intermittente, il suffit que le courant tombe dans une cavité et que de cette cavité sorte un siphon naturel, intermédiaire nécessaire entre la cavité et le point d'émergence.

Il faut, de plus, que le siphon puisse débiter un volume plus grand que le volume naturellement amené dans l'excavation,

Alors, supposons que le siphon marche ; il videra la cavité et la source débitera le volume qu'il donne ; la cavité vidée, l'air rentrera dans le siphon et la source s'arrêtera Mais en même temps la grotte se remplira, et lorsque le niveau de l'eau sera arrivé à celui de la partie haute du siphon, cet appareil recommencera à jouer, et ainsi de suite.

Pour obtenir une fontaine intercalaire, il suffit d'imaginer que la ramification qui donne l'eau à la grotte se subdivise et qu'une des branches se vide directement au bassin de la fontaine.

On voit que le minimum du débit correspondra au moment où cette seconde branche donnera seule, et le maximum à l'instant où son produit s'ajoutera au volume maximum du siphon.

Pour se rendre compte de fontaines intermittentes composées, il suffit de supposer deux cavités communiquant par un siphon. La plus grande des cavités sera située en amont de la plus petite ; admettons encore que le siphon qui communique à la fontaine débite un plus grand volume que celui qui réunit les grottes, et qu'enfin chacun d'eux laisse couler un volume supérieur au produit naturel de la source. Alors, il est évident que la grande cavité enverra à la petite plus d'eau qu'elle n'en reçoit ; elle finira donc par se vider : la petite, à son tour, sera mise à sec plusieurs fois pendant que la grande cavité se désemplira, l'eau qu'elle renferme étant emportée par le siphon du plus fort calibre.

De là les petites intermittences, et la grande correspondra au temps nécessaire pour remplir de nouveau la grande grotte.

Que l'on ajoute maintenant à cet appareil naturel une ramification du cours principal se rendant directement au bassin de la source, et l'on aura ce qu'on appelle une fontaine intercalaire composée.

Maintenant, que pendant la saison des pluies de nouvelles sources se développent; qu'elles produisent au minimum ce que le siphon des fontaines intermittentes ou intercalaires peut débiter, alors le régime de la fontaine passe à l'uniformité.

Veut-on un exemple d'une fontaine qui coulerait pendant l'été et s'arrêterait lorsque le débit des sources augmente en général ? Que l'on imagine dans la grotte de la fontaine intermittente simple, un orifice placé à une certaine hauteur au-dessus de l'extrémité de la courte branche du siphon.

Si cet orifice peut emmener tout ce que le conduit naturel fait arriver, cet orifice donnera naturellement lieu à une source d'un débit non interrompu.

Si l'eau augmente et que l'orifice précité ne puisse pas donner écoulement à tout le nouveau volume, la cavité se remplira, le siphon pourra s'amorcer, et s'il débite plus que le conduit qui amène les eaux à la grotte, celle-ci se videra, et par conséquent la fontaine à laquelle l'orifice précité donne naissance deviendra périodique, comme celle à laquelle le siphon envoie les eaux.

Enfin, si le volume du conduit principal augmente encore et s'il est égal à celui débité par le siphon, le plan des eaux étant dans la grotte au-dessous de l'orifice, il est manifeste que la fontaine qu'il desservait cessera de couler, tandis que celle du siphon deviendra uniforme.

Il existe en Angleterre plusieurs de ces fontaines qui coulent en été et s'arrêtent pendant l'hiver.

Voilà déjà des résultats bien variés, et je n'ai point fait entrer cependant en ligne les effets dus à la dilatation, à la compression, aux variations de température que l'air peut éprouver dans les conduits naturels.

Que l'on suppose, par exemple, un point haut dans ces conduits, et qu'une certaine quantité d'air se loge à partir de ce point haut dans la branche descendante. Pour un certain degré de température, la force élastique de l'air laissera l'eau franchir le point haut; mais que cette température augmente, l'eau ne pourra plus surmonter la nouvelle élasticité développée et l'écoulement s'arrêtera.

Enfin, lorsque les sources ne sont pas éloignées des bords de la mer, des irrégularités curieuses se présentent quelquefois dans leur débit.

Tantôt le débit croît et décroît avec la marée.

Tantôt il marche en sens inverse de la marée.

Dans le premier cas, le phénomène est facile à comprendre. La source peut être, en effet, considérée comme le niveau supérieur d'un tuyau irrégulier branché

sur le conduit souterrain qui l'alimente, lequel conduit est lui-même en communication avec la mer; lorsque cette dernière monte, le débit du grand conduit diminue et les frottements qui s'exercent contre les parois s'affaiblissent; en même temps, le niveau de la source doit tendre à s'élever et par conséquent son produit augmente.

L'effet contraire résulte de l'abaissement de la marée.

Je m'explique ainsi qu'il suit la marche inverse du débit de la source, relativement au flux et reflux; j'admets que la mer communique par un conduit avec une cavité remplie d'air, sans que pourtant son niveau puisse atteindre cette dernière; j'admets encore que la source vienne déboucher dans cette cavité avant de surgir du sol; je suppose enfin que le point où la source sort de terre soit réuni à la cavité précité, au moyen d'un conduit dont une partie affecte la forme d'un siphon renversé, *de manière à présenter une fermeture hydraulique*; l'air renfermé dans la cavité manquant d'issue ne peut s'échapper, même quand il est comprimé, et le seul résultat de cette compression est d'établir dans le conduit (côté de la cavité) une diminution de niveau nécessaire à l'établissement de l'équilibre.

Alors, si la marée monte, l'élasticité de l'air augmente et l'excès de compression subi par la source à son point d'émergence produit le même effet que si le niveau de cette dernière était exhaussé; son débit doit donc diminuer.

Quand la marée est basse, au contraire, le volume initial doit reparaître, parce que la pression redevient la même sur le point d'émergence de la source.

Dirai-je un dernier mot sur ces étangs qui, dans les grandes eaux, présentent un niveau moins élevé qu'à l'époque des sécheresses?

Ce qui se passe dans cette circonstance doit être analogue à ce que l'on remarque dans les vases tantales.

Il existe un siphon que le terrain dérobe aux regards et dont la courte branche est en communication avec les parties inférieures de l'étang. Dans les eaux basses, bien que leur niveau monte encore à une grande hauteur, cette dernière n'est point suffisante pour dépasser le point haut du siphon; l'appareil ne peut fonctionner et toute l'eau reste dans l'étang. Mais que les grandes eaux arrivent, elles surmonteront dans un moment donné ce point haut, le siphon marchera et les eaux descendront dans l'étang jusqu'au moment où il y aura équilibre entre le produit de la source et le produit du siphon souterrain.

Je me borne à ces détails, peut-être déjà trop circonstanciés, car l'explication de ces cas particuliers est aujourd'hui familière à tous.

Mais si l'on se reporte à un temps où l'instruction était le patrimoine d'un petit nombre d'élus, où la physique, d'ailleurs, était dans l'enfance, on trouvera naturel que les phénomènes que je viens de rappeler fussent l'origine d'une foule de craintes et d'espérances, de pratiques et de préjugés superstitieux.

Quant à moi, lorsque je considère tous ces jeux de l'hydraulique dont nous avons aujourd'hui la clef, mais qui, pour les temps passés, étaient pleins de mystères, je ne m'étonne point que, dans l'impossibilité où se trouvaient les anciens d'assigner des lois physiques à ces écoulements si variés, ils aient, en désespoir de cause, placé toutes les fontaines sous la direction absolue de leurs capricieuses divinités.

« Nous adorons, dit Sénèque, les sources des grands fleuves, et nous plaçons des autels *à l'endroit où les eaux sortent brusquement des souterrains.* »

Influence de la perméabilité du sol sur la position et la puissance des sources. — Les considérations précédentes nous ont fait entrevoir la relation

qui existe entre les sources et les terrains dans lesquels elles prennent naissance.

Les caractères des sources qui sortent d'un terrain imperméable sont tout différents des caractères de celles qu'on rencontre dans un terrain perméable. Ces différences ont été saisies et exposées d'une manière claire et précise dans les études hydrologiques de M. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées.

1° **Sources des terrains imperméables.** — Lorsque, par un temps pluvieux, on parcourt un pays à sol imperméable, on voit l'eau ruisseler de toutes parts; s'il y a de la pente, cette eau coule à la surface et forme de nombreux ruisseaux qui ravinent les terres et qui, réunissant leurs eaux, engendrent des rivières limoneuses, d'allure torrentielle. S'écoulant à l'air libre, les eaux pluviales arrivent rapidement et simultanément dans les vallées, il en résulte des crues violentes qui se produisent en quelques heures, mais qui disparaissent de même lorsque la pluie vient à cesser; pendant la sécheresse, l'alimentation de ces cours d'eau cesse complétement et ils ne tardent pas à tarir.

Lorsque le sol imperméable est peu accidenté, les eaux pluviales ne trouvent pas d'écoulement; elles s'accumulent à la surface sous forme de marais et d'étangs.

L'alimentation des cours d'eau situés sur les terrains imperméables est donc essentiellement superficielle; les sources importantes sont rares dans ces terrains, et cela se conçoit, car une source est toujours alimentée par de l'eau pluviale qui s'est infiltrée dans le sol.

Cependant, l'imperméabilité d'un terrain n'est jamais absolue; il y a toujours des crevasses, des fissures qui recueillent une certaine quantité d'eau; les assises calcaires ou sableuses que l'on trouve associées à beaucoup de terrains imperméables, ont toujours une légère perméabilité, quelque compactes qu'elles soient, et lorsqu'elles affleurent sur le flanc du coteau, ou lorsqu'elles se relèvent pour se montrer au jour, elles donnent lieu à des pleurs ou suintements qui se réunissent pour former des sources.

La présence des sources dans les terrains imperméables tient donc à des causes accidentelles; ces sources peuvent être nombreuses, mais il est bien rare qu'elles soient puissantes; en tous cas, elles sont irrégulièrement distribuées; on les trouve aussi bien dans le voisinage des sommets que sur le flanc d'un coteau ou dans une ondulation quelconque.

Elles ne forment point la base principale de l'alimentation des rivières; celles-ci recueillent surtout les eaux superficielles, amenées dans les vallées par une multitude de ruisseaux, lesquels, généralement, ne prennent point naissance dans une source.

2° **Sources des terrains perméables.** — Considérons maintenant un terrain perméable, il absorbe toutes les eaux pluviales qu'il reçoit; celles-ci ne s'écoulent pas à la surface, elles pénètrent dans le sol jusqu'à ce qu'elles se trouvent arrêtées par une assise imperméable. Les ruisseaux sont rares à la surface du pays, puisqu'il n'y a pas d'écoulement superficiel : l'eau s'accumule à l'intérieur sous forme de nappe à niveau variable, qui monte ou qui s'abaisse, suivant que la saison est plus ou moins pluvieuse.

Qu'une ondulation, qu'une vallée se présente, dont le fond soit au-dessous du niveau de la nappe souterraine, celle-ci s'épanche et prend son cours à l'air libre. Elle forme une rivière dont les eaux sont limpides, car elles ont été filtrées pendant leur voyage souterrain; la vitesse du courant n'est jamais bien grande,

parce que les pluies passent lentement de la surface du sol au fond de la vallée et que leur vitesse de circulation dans la terre est nécessairement restreinte.

Avec ces cours d'eau, on ne connait point les crues rapides et violentes; mais quand la nappe d'eau s'est élevée, elle met beaucoup de temps à descendre et il en résulte des crues modérées, mais durables.

Dans les terrains perméables, les eaux s'infiltrent par toute la surface du sol pour alimenter la nappe souterraine; celle-ci, drainée par les vallées, s'y épanche lorsque le fond de ces vallées est au-dessous du niveau de la nappe.

La communication entre la nappe souterraine et la rivière s'établit en divers points où l'eau trouve un débouché plus facile; ces points sont autant de sources.

Les sources dans les terrains perméables se rencontrent donc exclusivement au fond des vallées, c'est-à-dire sur le cours d'eau lui-même ou dans son voisinage; les plateaux et les versants conservent une aridité perpétuelle.

Si le terrain est également perméable, comme le sable, et présente à peu près partout la même facilité au passage des eaux, les eaux existent tout le long du lit et des berges de la rivière; elles sont nombreuses et faibles.

Généralement, il n'en est pas ainsi; il se présente toujours des portions de sol moins résistantes où le passage est plus facile, c'est là qu'on trouve les sources les plus abondantes, auxquelles correspond souvent l'origine d'un cours d'eau.

Ainsi la condition nécessaire et suffisante pour qu'il existe des sources et, par suite, un cours d'eau dans une vallée perméable, c'est que le niveau de la nappe d'eau souterraine soit plus élevé que le fond de la vallée.

Dans les parties hautes des vallées et dans beaucoup de vallées secondaires il n'en est pas ainsi; la nappe d'eau n'affleure pas le fond, on a ce qu'on appelle des vallées sèches.

La nappe d'eau, étant alimentée par les infiltrations des eaux pluviales, s'élève ou s'abaisse, suivant que la saison est plus ou moins humide; le débit des sources est lui-même soumis à ces variations. A la suite d'une sécheresse prolongée, des vallées que parcourait un courant d'eau peuvent se transformer en vallées sèches pour un temps plus ou moins long; les sources des parties hautes d'une vallée peuvent se tarir et la naissance de la rivière descend de plus en plus à mesure que la sécheresse se prolonge.

Les sources puissantes se rencontrent fréquemment aux points où les vallées secondaires viennent se souder à la vallée principale.

Lorsqu'on descend de la ligne de faîte qui sépare les bassins de la Loire et de la Seine par la vallée de l'Essonne jusqu'à la Seine, on se trouve d'abord sur le terrain qui porte le nom d'argile du Gâtinais; c'est un sol imperméable, sillonné de ruisseaux et autrefois parsemé d'étangs ou gâtines; en hiver, l'eau se montre de toutes parts, en été, tous les cours d'eau sont à sec; on rencontre bien çà et là des sources, elles sont disséminées au hasard, il en existe dans la forêt d'Orléans, au voisinage de la ligne de faîte; mais ces sources ont toutes un débit très-faible, elles ont pour origine quelques veines de sable plus ou moins pur placées sous l'argile et faisant office de drains naturels; après les argiles du Gâtinais, on entre sur un sol éminemment perméable, calcaire de Beauce et sables de Fontainebleau, tous les plateaux sont arides, bien des vallées secondaires sont sèches, les sources se rencontrent uniquement sur le thalweg de la vallée principale, et les plus importantes, qui portent le nom de noues ou de gouffres, apparaissent à la jonction de cette vallée et d'un vallon secondaire. Ces sources

donnent quelquefois passage au produit de l'infiltration des eaux pluviales tombées sur une vaste étendue; aussi sont-elles puissantes et souvent capables de faire tourner un moulin à quelques mètres de leur naissance.

3° **Niveaux d'eau.** — Dans un pays à sol imperméable, les sources, avons-nous dit, n'obéissent à aucune loi; elles sont dues à une cause accidentelle et on peut en rencontrer partout, dans le voisinage des sommets comme dans les ondulations des terrains.

Dans un sol perméable, les sources se rencontrent exclusivement dans le thalweg des vallées, c'est-à-dire au voisinage des cours d'eau; si le sol est d'une perméabilité homogène, comme le sable, les sources sont continues; si la perméabilité n'est pas homogène, comme dans les calcaires, les sources se trouvent aux points de plus facile passage et prennent quelquefois une importance capitale.

Lorsqu'un sol perméable est superposé à une couche imperméable, toute l'eau d'infiltration qui le pénètre est arrêtée par cette dernière; elle s'écoule dans le sens de la pente et paraît au jour sous forme de sources que l'on rencontre tout le long de la ligne de séparation des deux terrains perméable et imperméable.

Qu'une vallée d'érosion se présente dans un pareil terrain, on trouvera à flanc de coteau la ligne de séparation de l'assise perméable et de l'assise imperméable, et tout le long de cette ligne on trouvera des sources plus ou moins importantes, suivant que le passage est plus ou moins facile. La ligne séparative est ce qu'on appelle un niveau d'eau.

Ainsi, dans la vallée de la Marne, il existe un niveau d'eau qui correspond à la ligne séparative de l'argile plastique et du calcaire grossier.

4° **Puits artésiens.** — Les couches perméables et imperméables se superposent dans un même bassin comme le font des coupes de dimensions décroissantes que l'on empile les unes dans les autres; l'eau pluviale s'infiltre dans les couches perméables et descend dans la terre jusqu'à ce que la coupe soit pleine. Les couches imperméables restent sèches et l'eau se trouve emprisonnée entre deux de ces couches consécutives. Si l'on se place au centre du bassin et qu'on vienne à forer un tube à travers toutes les couches, l'eau emprisonnée s'élève et tend à prendre son niveau hydrostatique; ce niveau peut être dans certains cas plus élevé que la surface du sol, la diminution de pression se traduit par une production de vitesse; l'eau jaillit à la surface et l'on est en présence d'un jet d'eau naturel, de ce qu'on appelle un puits artésien.

Nous donnerons plus loin quelques détails sur les puits artésiens.

DE L'ART DE DÉCOUVRIR LES SOURCES

La géologie est le seul guide dans la recherche des sources. — Les notions précédentes nous montrent bien que la recherche des sources est intimement liée à la connaissance géologique du sol. Suivant l'imperméabilité ou la perméabilité des terrains, suivant le mode de superposition des assises perméables et imperméables, on saura dans quels points on a chance de rencontrer des sources. La géologie est le seul guide scientifique des chercheurs de sources.

Chercheurs de sources anciens et modernes[1]. — L'art de trouver les sources a été cultivé dans tous les temps; on le connaissait chez les Grecs ; les Romains avaient pour les chercheurs d'eau ou aquiléges les plus grands égards.

Cassiodore, en répondant à un magistrat qui lui avait écrit au sujet d'un *aquilége* nouvellement arrivé d'Afrique, recommande d'user de son expérience et de le traiter avec une distinction marquée :

« *Habeatur ergo iste inter reliquarum artium magistros ; ne quid desiderabile putetur fuisse, quod sub nobis non potuerit romana civitas continere.* »

Pline, Vitruve, Palladius étudient avec un soin diligent les moyens de découvrir les sources souterraines.

Je vais indiquer les principaux caractères auxquels ils prétendent qu'on doit les reconnaître. Et d'abord ils conseillent de faire les recherches dans les mois d'août, de septembre et d'octobre. A cette époque effectivement, les fontaines présentent le moindre débit, et si l'on en découvre alors, on doit concevoir la juste espérance qu'elles ne tariront dans aucun temps de l'année.

J'arrive maintenant aux signes qui trahissent le passage souterrain des eaux.

Un des signes les plus certains, dit Pline, ce sont les vapeurs qui s'élèvent sur les lieux au-dessous desquels coulent des veines liquides. Pour apercevoir ces vapeurs, il recommande de se coucher par terre *avant le soleil levé* et d'examiner attentivement, le menton appliqué contre la terre, si quelque colonne de vapeur ne vient pas à s'élever et a sondoyer au-dessus des lieux où il ne se trouve aucune humidité causée par les eaux sauvages.

Cassiodore ajoute une observation que je rappellerai en raison de sa singularité ; d'après lui, les aquiléges mesurent la profondeur du courant souterrain par la hauteur à laquelle la vapeur semble s'élever : « *Addunt etiam in columnæ speciem conspici quemdam tenuissimum fumum, qui quanta fuerit altitudine porrectus ad summum, tanto in imum latices latere cognoscunt.* »

Mais cette opération est, à ce qu'il paraît, très-pénible, car Pline ajoute : « *Certior multo nebulosa exhalatio est ante ortum solis longius intuentibus.... sed tanta intentione oculorum opus est, ut indolescant.* »

Aussi a-t-on essayé de substituer à la vue simple d'autres moyens de reconnaître si ces vapeurs s'exhalaient ; et, par exemple, on conseille de mettre *à la même heure*, sur les lieux où la source est espérée, une aiguille de bois en équilibre; cette aiguille est composée de deux parties, dont l'une doit être poreuse et très-hygrométrique, comme l'aulne, puis, s'il se dégage effectivement de la vapeur, l'extrémité poreuse s'inclinera vers la terre.

Vitruve engage encore à creuser un puits de 3 pieds de diamètre, sur 5 à 6 de profondeur et de placer au fond, lorsque le soleil se couche, un vase d'airain ou de plomb frotté d'huile ; on renverse ce vase, on remplit la fosse avec des planches et des feuillages qu'on recouvre avec de la terre, et si le lendemain des gouttes d'eau sont attachées au vase, il affirme que la nappe liquide est au-dessous et qu'on la trouvera en creusant.

Belidor prétend, d'après Cassiodore, que si des tourbillons ou nuées de petits moucherons volent près de la terre, toujours à la même place, c'est qu'ils sont attirés par quelques exhalaisons de vapeur provenant d'une veine fluide.

Il recommande, à l'exemple de Vitruve, de noter les lieux où l'on rencontre des joncs, des roseaux, du baume sauvage, de l'argentine, du lierre terrestre. lorsque ces plantes ne peuvent être nourries que par les eaux sauvages.

[1] Ce paragraphe est extrait de l'ouvrage de Darcy.

Pline prescrit de faire des fouilles au point précis où l'on voit des masses de grenouilles semblant couver, tant elles pressent la terre pour s'approprier les vapeurs qui s'en exhalent.

Quand le sol est recouvert de gelée blanche, il est facile de s'assurer si un courant existe à peu de profondeur, car cette gelée ne tient pas sur sa direction, j'ai eu plusieurs fois l'occasion de faire cette remarque dans les temps de neige, en suivant la ligne de l'aqueduc de Dijon. La neige s'affaisse et fond en partie sur la ligne suivie par cette construction, bien que la voûte soit partout à plus de 1 mètre sous terre et que l'eau coule encore à 1 mètre au-dessous de l'extrados de cette voûte recouverte elle-même d'une chape.

Tels sont les principaux procédés que nous ont légués les anciens pour la découverte des sources. Mais avant de clore avec les traditions du passé, me sera-t-il permis de rappeler que Moïse, faisant jaillir une source dans le désert, devait avoir des imitateurs jaloux de renouveler la lutte que les devins de Pharaon ne craignirent pas d'engager avec le libérateur du peuple juif?

Aussi voyait-on déjà, dans le quinzième siècle, des hommes marchant à la découverte des sources, tenant deux des branches d'une fourche de coudrier, et attendant que la troisième, s'inclinant irrésistiblement vers la terre, indiquât la présence d'une nappe souterraine.

Le plus célèbre de la secte fut un nommé Jacques Aymard, qui fit grand bruit à Paris, en 1693 ; sur l'ordre de Colbert, l'abbé Gallois le présenta à l'Académie; mais la docte assemblée lui tendit un piége dans lequel se brisa la baguette enchantée du faux Moïse et le cours de ses miracles si variés fut brusquement interrompu. On sait que la baguette divinatoire, saluée sous les noms de Verge de Moïse, de Bâton de Jacob, de Verge d'Aaron, n'avait pas seulement la vertu de découvrir des sources ; elle tournait de plus sur les métaux, sur les trésors, sur les meurtriers qu'elle livrait à la justice, et sur les reliques des saints régulièrement canonisés ; sa vertu créa de tels prodiges qu'on recourut, pour l'expliquer, à l'intervention des puissances infernales. Mélanchthon lui-même, l'un des héros de la religion réformée, parlant des filons de mines qu'elle aidait à découvrir, ne put expliquer autrement cette propriété singulière que par des relations sympathiques qui uniraient ensemble les végétaux et les minéraux.

On est autorisé à croire que le culte de la baguette était déjà pratiqué dans l'antiquité. Elle est mentionnée dans les écrits de Neuheusius, de Varron, d'Agricole, de Cicéron: l'orateur romain, dans les conseils qu'il donne à son fils Marc, lui défend de se dérober aux affaires publiques, lors même qu'il découvrirait un trésor par la grâce de la baguette divine : « *Quid si omnia nobis quæ ad victum cultumque pertinent, quasi virgulâ divinâ, ut aiunt, suppeditarentur.* »

Mais il y avait aussi, à cette époque, des gens difficiles qui ne prêtaient pas foi aisément à ces prodiges.

Un chercheur de trésors avait proposé au poëte Ennius d'en découvrir un moyennant un drachme : « Je vous donne de bon cœur ce drachme, répondit-il, mais à prendre sur le trésor que vous trouverez :

Quibus divitias pollicentur, ab iis drachmam ipsi petunt.
De his divitiis deducam drachmam, reddam cætera.

Lorsqu'une source avait été trouvée par les procédés racontés avant la petite digression sur la baguette divinatoire, il fallait en tirer le meilleur parti possible : Vitruve donne le moyen suivant de la mettre à profit.

Si les signes que nous venons de décrire, dit-il, se rencontrent en quelque lieu, il faudra y creuser un puits, et si l'on aperçoit une source, en faire plusieurs autres à l'entour et les réunir par de petites galeries.

Ces précautions semblent indiquer que Vitruve ne comptait guère que sur des suintements dont il cherchait à augmenter le volume en les réunissant tous.

Cependant il semble résulter d'une lettre déjà citée et écrite par Cassiodore, que l'on arrivait parfois à des résultats bien plus importants, puisqu'il y recommande formellement au magistrat de faire accompagner l'aquilége d'Afrique par un homme habile dans la mécanique et sachant élever les eaux que l'on viendrait à découvrir.

Telle est à peu près la série des procédés auxquels on avait recours dans les temps anciens pour découvrir les sources, et qui constituaient la science de l'aquilége.

Avant d'arriver aux méthodes d'investigation d'un chercheur de sources dont le nom a été souvent répété dans les feuilles publiques, je vais donner quelques résultats d'expérience.

Une source, qu'on appelle à Dijon la fontaine des Suisses, avait presque entièrement disparu ; elle ne donnait plus qu'un cinquième de litre à la minute. Or, deux lignes de peupliers plantés le long de la petite vallée que la source parcourt offraient le phénomène suivant : les peupliers avaient été plantés à la même époque, et cependant le premier de chaque ligne présentait un développement plus que double des suivants.

« Je fis creuser, dit Darcy, une tranchée dans le lieu présumé d'où devait émerger la source, et je remarquai que les racines des deux premiers arbres s'étaient avancées de 8 à 10 mètres vers cette source, au milieu du bassin naturel de laquelle elles s'étaient établies pour s'en emparer en entier. Quelques travaux modifièrent le cours de la source, et son volume redevint égal à 12 ou 13 litres par minute.

« J'ai reconnu aussi, à la suite de terrassements exécutés au point de jonction des vallées secondaires avec la vallée principale, dans les terrains calcaires, l'existence de cours d'eaux se dirigeant vers la vallée principale dans des conduits à peu près circulaires, formés par les dépôts successifs de carbonate de chaux, qui agglutinaient les sables dont le sous-sol du vallon était composé. »

Méthode de l'abbé Paramelle. — L'un des chercheurs de sources les plus renommés dans le temps actuel, M. l'abbé Paramelle, n'est point un géologue connu, peut-être même n'est-il pas géologue ; mais, à coup sûr, il possède certaines connaissances empiriques qui le dirigent dans ses excursions hydrauliques. L'abbé Paramelle ne communique à personne ses moyens d'investigation ; il était cependant facile à un géologue exercé de les deviner s'il lui était donné d'accompagner cet hydroscope dans une de ses excursions. Aussi les quelques lignes suivantes témoigneront que ce secret a été surpris.

Le procédé d'exploration de M. Paramelle, bien que reposant, comme on le verra, sur une base rationnelle, présente néanmoins un large côté aléatoire ; ses succès ne peuvent donc point se compter par le nombre de ses promenades.

Dans les terrains massifs, c'est-à-dire non stratifiés, le relief du terrain présente des formes arrondies.

Lorsque la masse minérale, à raison de sa dureté et de sa cohésion, a pu résister aux érosions plus ou moins violentes des cataclysmes, l'inclinaison des côteaux est rapide comme dans les chaînes de montagnes granitiques.

Si les terrains massifs sont argileux, marneux et peu résistants, leurs formes

sont plus mollement accusées, et les pentes des versants moins rapides; l'altération que subissent à la longue ces marnes, ces argiles, vient encore s'ajouter à leur facilité d'érosion pour déterminer, comme conséquence, l'adoucissement des versants sur lesquels elles reposent.

Enfin lorsque, dans les terrains stratifiés, une assise d'argile ou de marne est intercalée entre des masses rocheuses et résistantes, il est aisé de s'en apercevoir au premier aspect général d'une localité; en effet, le profil du relief, d'abrupte et saccadé qu'il est toujours à l'affleurement des couches rocheuses, passe brusquement à une pente douce ou arrondie dans la partie correspondante à la couche altérable.

Les circonstances de relief des terrains que M. Paramelle connaît par son expérience, sinon par une appréciation scientifique, lui donnent immédiatement la clef de la nature du sous-sol qu'il doit considérer, premier moyen d'investigation. L'état et la nature de la végétation lui en offrent un second.

En effet, au fur et à mesure que M. l'abbé Paramelle remonte à pas lents un vallon ou une dépression continue pour y découvrir une source, on voit bien aux regards qu'il jette sur les plantes et sur le sol, qu'il cherche à induire de la nature et de la force végétatrices des premières, d'une part, et, d'autre part, de la consistance du second, la présence plus ou moins probable des eaux, et même leur profondeur approximative au-dessous de la superficie du terrain.

Nous pouvons maintenant nous faire une idée de la méthode de M. Paramelle. Et d'abord, suivons-le sur un plateau composé de masses rocheuses et stratifiées; ces plateaux, généralement recouverts d'une faible épaisseur de terrain détritique perméable, sont eux-mêmes absorbants. Souvent même, lorsque ces plateaux forment des bassins fermés, on les voit perforés par des bas-fonds, puits ou entonnoirs, où se perdent les eaux pluviales; ils sont d'ailleurs latéralement découpés par des gorges plus ou moins profondes, où, par une foule de fissures, se rendent plus ou moins promptement les eaux. Sur ces terrains, qui présentent un aspect desséché, la végétation est peu vigoureuse, les arbres rares et rachitiques; aussi M. l'abbé Paramelle à peine entrevoit-il ces terrains qu'il s'empresse de dire : *Il n'y a rien à faire ici, n'allons pas plus loin.*

Cette conclusion négative, chacun l'avait déjà prononcée. Lorsque le relief du terrain annonçait au contraire, d'après les indications précédentes, un sous-sol de marne ou d'argile imperméable, il était rare que M. Paramelle n'annonçât pas l'existence d'une source, ou du moins la chance de la découvrir en tel ou tel point qu'il indiquait même d'assez loin, soit dans un vallon, soit dans un pli du sol.

Cette allégation reposait sur des bases aussi probables que la décision négative dans le cas précédent.

En effet, le sous-sol, dans la nouvelle hypothèse qui nous occupe, est presque toujours recouvert d'un terrain détritique, ne fût-ce que de terre végétale, au lieu d'un terrain de transport soit ancien, soit fluviatile, plus ou moins moderne; les eaux pluviales y pénètrent et arrivent par suintements jusque sur le sol vierge, où elles circulent en suivant la pente qui tend à les réunir dans le thalweg des plis de ce sous-sol. Elles arrivent ainsi jusqu'aux parties inférieures du vallon où elles coulent sous la masse du sol, et quelquefois le détrempent jusqu'à le rendre marécageux.

Alors, M. l'abbé Paramelle dirigeait ses pas vers l'origine du vallon, s'arrêtait au point où il supposait son profil le plus resserré et où, en même temps, l'épaisseur du sol détritique ou diluvien lui semblait la moins grande, puis il prescrivait en ce lieu l'exécution d'une tranchée perpendiculaire à la direction du

thalweg du vallon, et la construction d'un mur imperméable descendant à une profondeur qu'il déterminait à peu près. Enfin, pour couronner l'œuvre, il annonçait qu'en plaçant un tube à travers ce mur, il en sortirait une source grosse comme le petit doigt, le pouce ou l'avant-bras, suivant l'étendue du bassin sur lequel il opérait.

C'est par une longue habitude que M. Paramelle est parvenu à apprécier rapidement non-seulement les formes du sous-sol imperméable, et, jusqu'à un certain point, l'épaisseur des terrains modernes, alluviens ou détritiques, qui le recouvrent, mais encore par l'étendue des vallons, bassins ou dépressions, la quantité d'eau qu'on pouvait faire surgir sur un point choisi.

Pour un vallon secondaire creusé dans l'affleurement de puissantes assises d'argile ou de marne, au-dessous des escarpements abruptes qui dominent une vallée principale, les circonstances sont les mêmes, ainsi que la méthode d'investigation; seulement, dans ce cas, l'épaisseur des terrains d'éboulis ou d'anciens dépôts de moraines peut mettre le chercheur de sources en défaut; quelquefois, au contraire, lorsque au-dessous des vallées explorées un pli des terrains supérieurs déverse des sources masquées sous les dépôts, le succès des recherches dépasse toute espérance.

On voit donc que guidé, comme il l'est en effet, par les considérations précédentes, M. l'abbé Paramelle peut souvent réussir dans ses recherches.

D'autres fois des dislocations inaperçues ou de grands éboulements déplaçant les masses argileuses jettent l'abbé Paramelle dans l'erreur. Il doit arriver encore qu'en opérant sur un vallon, dont le sous-sol n'est imperméable que sur une zone bornée par l'affleurement d'une assise marneuse d'une épaisseur médiocre, les indications portent en dehors de sa limite cachée par des dépôts superficiels. Les intéressés, du reste, ont souvent à s'imputer de leur côté la cause des non succès; au lieu d'approfondir assez leurs tranchées et d'enraciner convenablement le mur dans le sous-sol imperméable, ils s'arrêtent avant le moment convenable, et en ne descendant pas assez les fondations du mur par une économie mal entendue, ils laissent échapper les eaux par-dessous sans les intercepter et les recueillir.

Les recherches de M. l'abbé Paramelle sont donc exposées à bien des causes d'erreur qui peuvent tromper les prévisions; toutefois, on comprend que les déceptions sont beaucoup moins fréquentes dans des localités à sous-sol franchement massif, argileux, marneux, imperméable.

Il est inutile d'ajouter, qu'une fois la source mise à jour, soit qu'on en réunisse les suintements dans un puisard, soit qu'on la recueille au moyen d'un orifice pratiqué dans le petit barrage, enraciné dans le sous-sol imperméable, il est facile de la distribuer, selon les besoins, partout où son niveau permet de la conduire.

Tel est, en résumé, la méthode de M. l'abbé Paramelle. On concluera aisément, de ce qu'on vient de lire, que ce procédé ne peut être appliqué à la recherche des sources, circulant dans une couche perméable, ayant des couches imperméables pour base et pour toit, ces sources dites artésiennes ne s'obtiennent en effet que par la fracture naturelle ou le percement artificiel de l'enveloppe supérieure; mais, encore une fois, le mode d'investigation de M. Paramelle reprend sa valeur et son utilité pratique pour la recherche des nappes, formées par le suintement des eaux pluviales à travers des terrains détritiques, placés sur un terrain composé d'argiles compactes, ou de marnes ou, enfin, de terrains massifs quelconques imperméables.

Il n'y a là, comme on le voit, ni procédés mystérieux, ni magie; un peu de mise en scène peut-être! Toutefois, il faut reconnaître que, malgré les incertitudes qu'ils présentent, les moyens d'exploration de l'abbé Paramel ont été pour les habitants des campagnes l'occasion de découvertes précieuses, en permettant parfois de faire surgir du sol, des eaux qui, suintant et circulant à une certaine profondeur, allaient auparavant se perdre dans le sous-sol des bas-fonds et dans le thalweg des vallons. En effet, ces eaux, ainsi ramenées à la surface, présentent une utilité réelle au lieu de contribuer le plus souvent à rendre marécageux et improductifs des terrains, naturellement riches de puissance végétative par leur composition minérale, par leur position, et destinés à prendre une grande valeur par l'assainissement.

DES SOURCES ARTIFICIELLES

Lorsqu'on est parvenu à savoir qu'un terrain renferme des couches aquifères, on peut en réunir les eaux par les procédés suivants :

1° Si elles coulent souterrainement dans une vallée étroite, on en arrête le cours à l'aide d'un corroi ou d'un bétonnage, descendant jusqu'aux couches relativement imperméables;

2° On peut aussi soutirer l'eau au moyen de pierrées, comprenant une voûte et des culées imperméables avec une cuvette et un radier perméables.

Ces pierrées fonctionnent comme des drains; on peut même recourir à de simples tuyaux de drainage, pour recueillir et amener dans un réservoir toutes les eaux que renferme un sol perméable.

Procédé de Bélidor. — Bélidor avait indiqué comme il suit le moyen de créer des sources artificielles :

« Quand on veut, dit-il, avoir beaucoup d'eau, on creuse une tranchée à une profondeur convenable, avec pente suffisante; on étend sur le fond un lit de terre glaise bien battue, ensuite l'on construit deux murs pour former un petit canal que l'on recouvre avec des pierres plates, et ensuite des gazons renversés pour empêcher qu'en recomblant la fouille il ne tombe rien sur le fond. »

Eaux de Gray. — Près de Gray, il y a des élévations, mais sans aucune source; et, pour obtenir des fontaines, M. Normand, ingénieur, fit faire un long fossé qui contournait la hauteur supérieure à Gray, avec pente convenable. Sur le côté de ce fossé qui regardait le bas du monticule, il fit faire un bon mur avec corroi derrière; de l'autre côté, il ne fit faire qu'un mur à sec, afin que les eaux puissent passer à travers. Entre les deux murs, il établit une rigole en pierres de taille. Enfin, il plaça des dalles sur toute cette construction, qui, en réunissant toutes les eaux supérieures, les mène à un bassin d'où part le tuyau de conduite.

On recueillit ainsi une quantité d'eau, malheureusement très-faible, car il lui arrive de n'atteindre au mois de mai que 19 litres par minute.

Cependant, en calculant la quantité d'eau tombée sur la superficie des versants, on pouvait compter sur un débit beaucoup plus considérable.

Il ne faut donc pas ajouter foi aux calculs basés sur la quantité d'eau, qui tombe annuellement sur une surface donnée; en effet, une partie de cette eau s'écoule à la surface, une autre s'évapore, une autre pénètre dans le sol; la ré-

partition varie avec les saisons et avec la nature du sol. En été, presque toute l'eau qui tombe retourne dans l'atmosphère et ne profite ni aux cours d'eau ni à la nappe souterraine. Dans les saisons froides, l'évaporation est faible; dans les terrains imperméables, la plus grosse part de l'eau pluviale coule à la surface et alimente directement les rivières; dans les terrains perméables, au contraire, l'écoulement superficiel a peu d'importance, et presque tout le volume pénètre à l'intérieur du sol pour alimenter les nappes souterraines.

Dans les terrains perméables, assis sur une couche imperméable, il sera donc possible de recueillir à peu près toute la quantité d'eau pluviale, qui tombe en hiver.

La création des fontaines artificielles est très-facile dans les terrains perméables[1]. — « L'eau potable ne doit pas seulement être conduite et distribuée par des canaux artificiels, elle doit aussi être recueillie par un réseau de tuyaux artificiels, pour que, dans tout son parcours, à partir de la terre où elle tombe jusqu'au robinet où elle se consomme, elle soit à l'abri des altérations accidentelles. »

Ces tuyaux collecteurs sont pour *l'extrémité rurale* de l'aqueduc, ce que sont pour son extrémité urbaine les tuyaux distributeurs; et de même que l'aqueduc est une rivière artificielle, de même ces tuyaux nourriciers sont des sources artificielles; posés dans des sables siliceux, à 4 ou 5 pieds de profondeur, ils recueillent l'eau de pluie au point de sa plus grande pureté, au point où elle s'est débarrassée par la filtration de toute imprégnation atmosphérique, sans avoir eu le temps d'absorber des impuretés terrestres.

A Farnham, à Rugby, à Sandgate, à Ottery-Saint-Mary, ce système a été pratiqué; la disposition des tuyaux de drainage, destinés à recueillir l'eau, varie selon la configuration du sol. En général, il convient de faire monter les tuyaux principaux dans le sens de la pente du terrain, en dirigeant les embranchements à droite et à gauche; quelquefois on entoure une colline d'un tuyau collecteur, en suivant les contours de sa base et en dirigeant un embranchement vers son sommet, le long de chaque pli creux; quelquefois, comme sur la bruyère de Farnham, un simple drainage en patte d'oie, posé sur un plateau très-légèrement incliné, fournit une masse d'eau qui dépasse toutes prévisions.

On ne saurait rien préciser à l'avance sur le coût du réseau collecteur, il variera évidemment avec la configuration du sol et avec sa nature.

M. Ward fait observer que lorsqu'on peut se ménager, à l'amont des drains, un plateau sablonneux, convenablement incliné, la pluie qui y tombe et s'y infiltre est dirigée vers le tuyau, de sorte que le drainage d'un seul hectare sert à recueillir l'eau, due à une surface beaucoup plus grande. C'est ainsi qu'à Farnham le drainage d'un hectare de bruyère, suffit à l'alimentation de 1,500 personnes.

L'influence de cette circonstance est pareillement manifestée d'une manière frappante à Rugby et à Sandgate, deux villes, comme on l'a vu, alimentées par des sources artificielles, semblables à celles de Farnham. La population de Rugby est de 10,000 âmes, et pour la desservir, on projeta un réseau collecteur de 1,000 acres (404,67 hectares). M. Rammel commença par poser un tuyau principal pour recevoir les embranchements secondaires; mais à son grand étonnement, ce premier tuyau suffit seul à l'alimentation de toute la

[1] Paragraphe extrait de l'ouvrage de Darcy.

ville; ce tuyau, qui est à joints ouverts, comme les tuyaux de drainage ordinaires, a 9 pouces (22c,86) de diamètre et 185 yards (1691m,60) de développement. A Sandgate, le premier tuyau du réseau suffit, sans embranchement aucun, à la consommation de la ville.

La disposition, le degré d'inclinaison des terrains collecteurs influent, d'ailleurs, sur un autre élément de la dépense de l'opération entière, c'est-à-dire sur la capacité des réservoirs à établir pour l'approvisionnement de l'eau versée par les drains.

A Farnham, l'emmagasinage naturel de l'eau dans les sables est si complet, le régime de celle conduite par les drains est tellement régulier, que tout le service de la ville a pu se faire sans inconvénient, au moyen d'une simple citerne, de 250 mètres cubes de capacité. L'entretien du terrain collecteur, avec son réseau tubulaire, n'exige, en général, que de très-faibles sacrifices. M. Ward dit qu'à Farnham, le soin des tuyaux collecteurs est confié à un homme, à un vieux draineur qui lui a assuré que cette besogne ne lui prenait en moyenne qu'une journée de travail par mois; ce travail consiste principalement dans l'enlèvement du sable, qui entre dans les tuyaux et qui tombe dans de petites fosses ménagées de distance en distance pour le recevoir.

M. Ward décrit aussi la nature des terrains qu'il a rencontrés dans les environs de Bruxelles, et qui lui semblent favorables aux opérations précitées.

1° Sable perméable d'une profondeur d'un demi-mètre à 1 mètre, dont le quart supérieur est noirci par un mélange de terre végétale résultant, sans doute, de la décomposition de la bruyère.

2° Au-dessous de cette bande noire se présente, en général, au moins un demi-mètre de sable pur, précisément l'épaisseur désirable pour la filtration de l'eau.

3° Sous ce filtre naturel, bande de sable durci, espèce de croûte ou d'agrégat, évidemment imperméable à l'eau; un sous-sol, exactement pareil, existe sur une grande partie des bruyères anglaises, et c'est sur sa surface, au fond de la couche sablonneuse, qu'il convient de placer les tuyaux collecteurs.

Sir Charles Lyell, dans sa *Monographie* sur la géologie comparée de l'Angleterre et de la Belgique, s'exprime ainsi :

« *Somme toute*, ces sables (les terrains ci-dessus décrits) m'ont rappelé, par leur aspect et par leur caractère minéral, une grande partie de la division ferrugineuse du *lower green sand*, dans le sud-est de l'Angleterre. » C'est précisément, ajoute M. Ward, le *lower green sand* qui fournit l'eau pure et délicieuse, dont jouissent *les habitants de Farnham;* on comprend, au reste, qu'une pareille eau, qui ne traverse que des sables siliceux, insolubles, et circule sur des terrains de même nature, doit jouir d'une grande pureté. L'aphorisme de Pline : « *Tales sunt aquæ, quales sunt terræ per quas fluunt*, » est vrai de nos jours comme de son temps; d'autres natures de terrains collecteurs influeraient donc sur la qualité des eaux versées dans les drains.

Je terminerai cet exposé par quelques mots sur la superficie, que le terrain collecteur doit offrir.

S'il s'agissait, par exemple, d'obtenir un volume d'eau annuel égal à V, on remarquerait que la terrain collecteur doit offrir une surface telle, qu'en la multipliant par la hauteur de pluie qui tombe annuellement, on obtienne le volume précité; mais évidemment on ne doit pas prendre la hauteur entière de la pluie qui tombe; l'évaporation et toutes les autres causes de perte doivent faire réduire d'un quart cette hauteur, suivant les ingénieurs anglais; je trouve même

le coefficient 0,75 un peu faible, et je crois qu'il vaudrait mieux calculer sur moitié de perte[1].

Appelant H la hauteur de pluie qui tombe, S la surface cherchée, on aura :

$$S \times 0{,}50\,H = V,$$

d'où

$$S = \frac{V}{0{,}50\,H} = 2 . \frac{V}{H} .$$

Je viens de dire que l'on ne devrait compter que sur la moitié de la hauteur de la pluie qui tombe, pour la création des fontaines artificielles, M. Babinet, de l'Institut, a adopté la même proportion.

Dans un excellent article ayant pour titre : *l'arrosement du globe*, et publié par ce savant dans la *Revue des Deux-Mondes*, il raconte et précise en ces termes l'idée connue de Bernard de Palissy, sur la création des fontaines artificielles.

« Dans la France, et notamment dans les environs de Paris, 2 hectares reçoivent à peu près par an 10,000 mètres cubes d'eau, dont la moitié peut être utilisée pour la fontaine artificielle, c'est-à-dire environ 5,000 mètres cubes. Or, ce que les fontainiers appellent *pouce d'eau* est une fontaine qui fournirait aisément aux besoins de deux forts villages, hommes et bestiaux. Une fontaine donnant *un demi-pouce* d'eau fournit par an 3,650 mètres cubes (à raison de 20 mètres cubes par jour pour le pouce d'eau) ; c'est beaucoup moins que les 5,000 mètres cubes de pluie que l'on peut utiliser avec 2 hectares, en admettant une perte de moitié. Il faudrait donc bien moins de 2 hectares préparés comme nous allons le dire, d'après M. Séguin, pour obtenir infailliblement une belle et utile fontaine. Voici, en un mot, mon extrême conclusion.

« Choisissez un terrain de 2 hectares ou de 1 hectare et demi, dont le sol soit sablonneux, comme le bois de Boulogne et les autres bois qui entourent Paris, et qui offre, de plus, une légère pente vers un côté quelconque pour fournir ensuite un écoulement aux eaux. Faites, dans toute sa longueur et au plus haut, une tranchée de 1 mètre 1/2 à 2 mètres de profondeur sur environ 2 mètres de large. Aplanissez le fond de cette tranchée et rendez-le imperméable par un pavé, un macadamisage, un fond de bitume, ou, ce qui est plus simple et moins coûteux, par une couche de terre glaise, substance commune dans les environs de Paris. A côté de cette tranchée, faites-en une autre pareille, dont vous rejeterez la terre pour combler la première, et ainsi de suite, jusqu'à ce que vous ayez, pour ainsi dire, rendu tout le sous-sol de votre terrain imperméable à l'eau de pluie. Plantez-le tout d'arbres fruitiers, et surtout d'arbres à basse tige qui ombragent le terrain sablonneux et arrêtent les courants d'air qui tendraient à réabsorber la pluie ; enfin pratiquez, dans la partie la plus basse du terrain, une espèce de mur ou contre-fort en pierre avec une issue au milieu. Vous aurez infailliblement une belle et bonne source, qui coulera sans intermittence et suffira aux besoins d'un village entier ou d'un vaste château. Je n'ai pas sous les yeux le prix de revient calculé d'après le prix de la main-d'œuvre et des transports pour Paris et les départements, mais je me souviens très-bien que cette dépense était accessible à toutes les fortunes des particuliers dans l'aisance et à toutes les communes privées d'eau. La spéculation pouvant même s'en emparer pour faire

[1] Ainsi que nous l'avons expliqué plus haut, il faut faire les réserves sur la proposition adoptée par Darcy. Le cœfficient dépend essentiellement du degré de perméabilité du sol. Nous aurons lieu de revenir sur ce sujet.

le bien public avec l'utilité privée. Dans la forêt de Fontainebleau, si pauvre de fontaines pour les hommes et pour le gibier, où le sol est si sablonneux et la terre glaise si à proximité, comment n'a-t-on point encore pratiqué de fontaines artificielles?

Dans un voyage que j'y fis vers 1845, je croyais avoir fait adopter cette idée à plusieurs des notables habitants ou des autorités de cette délicieuse résidence. Il est mille localités des environs de Paris que je pourrais également indiquer. Le sol, bien loin d'être rendu infertile par ces opérations, en devient plus meuble, plus facile à amender, et les arbres qu'il porte pour le protéger contre l'évaporation sont d'un bon produit, et plantés dans les conditions les plus avantageuses. Tout particulier, toute commune, toute administration qui aura établi, n'importe à quels frais et sur quelle échelle, une fontaine artificielle, et qui pourra dire alors : Faites comme moi, et même mieux que moi, en évitant les inconvénients que j'ai rencontrés et que je vous signale, aura bien mérité de la société entière, et pourra se dire : J'ai fait quelque chose d'utile.

Observations sur la création des sources artificielles. — MM. Ward et Chadwyck ont préconisé en Angleterre le système des sources artificielles pour l'alimentation des villes.

Ce système consiste à drainer, comme on le fait en agriculture, des sols convenablement choisis, capables de fournir une eau pure et potable ; ce sont les sols sableux et siliceux qui conviennent le mieux ; les sols calcaires donnent une eau médiocre, quelquefois mauvaise.

On compte d'ordinaire sur la moitié de l'eau pluviale tombée sur le pays ; en Angleterre, il tombe $1^m,20$ de hauteur de pluie ; on en recueille donc $0^m,60$, soit 6,000 mètres cubes par hectare et par an.

Pour une population de 1,000 âmes, à laquelle on veut donner 150 litres d'eau par tête et par jour, il faut par an 54,000 mètres cubes; c'est-à-dire que le drainage de 9 hectares suffira à alimenter une agglomération de 1,000 habitants.

En admettant qu'à Paris il tombe 1 mètre de pluie (ce nombre est supérieur à la moyenne), il faudra 10 hectares par 1,000 habitants, soit 20,000 hectares ou un carré de 14 kilomètres de côté pour la ville entière.

Il est évident que, dans l'application, le drainage de grandes superficies pour l'alimentation des villes soulèverait de grosses difficultés et ne serait guère applicable.

Le procédé semble donc être réservé pour les petites agglomérations. Mais quelquefois, il ne se présente plus comme un simple drainage agricole ; il peut exister une sorte de drainage naturel, une couche perméable de grande étendue reposant sur une assise imperméable ou comprise entre deux assises imperméables ; dans ce cas, si l'on établit une galerie de captation dans la couche perméable, on peut recueillir de grandes quantités d'eau, capables de suffire à l'alimentation d'une ville importante.

Lorsqu'on projette une alimentation par drainage, le premier point à connaître est la hauteur de pluie annuelle qui tombe dans le pays.

Il y a aujourd'hui des pluviomètres installés à peu près partout et il est facile d'obtenir un nombre suffisamment approché.

La quantité de pluie qui tombe dans le bassin de la Seine augmente avec l'altitude et avec le voisinage de la mer. Ainsi, que l'on se dirige du massif du Morvan vers la Manche, on trouve les résultats suivants :

Le réservoir des Settons à l'altitude de	600 mètres,	reçoit	1750	millimètres de pluie.
La ville de Saulieu	539	—	1044	—
Clamecy	147	—	719	—
Auxerre	122	—	682	—
Sens	81	—	626	—
Paris	39	—	556	—
Rouen	43	—	793	—
Le Havre	89	—	924	—

On voit que, dans la zone centrale du bassin de la Seine, zone qui comprend Paris, il ne faut pas compter sur une hauteur annuelle supérieure à 600 millimètres.

Distribution d'eau de Liége. — La distribution d'eau de Liége est alimentée par les eaux souterraines du sol crétacé qui forme une ligne de coteaux dominant la ville.

« On va chercher les eaux, dit M. de Freycinet, au moyen de galeries traversant le terrain houiller et les argiles de la base du terrain crétacé et ensuite pénétrant dans les couches perméables supérieures reconnues très aquifères. La galerie principale, dite galerie d'Ans, débouchera près des faubourgs, à 65 mètres au-dessus du niveau de la Meuse. Elle aura $1^m,80$ sur $1^m,20$ de section, cinq kilomètres de longueur et une pente dirigée vers la ville, de 1 millimètre par mètre. Soigneusement maçonnée dans tout son parcours à travers les argiles et les terrains houillers, afin de ne pas recevoir les infiltrations moins pures de ces couches, elle sera, au contraire, à vif dans le terrain crétacé. A l'extrémité de cette galerie, c'est-à-dire en plein dans la craie, et à 36 mètres au-dessous du sol en même temps qu'à 25 mètres sous la surface actuelle de l'eau, deux autres galeries, de 2,500 mètres de longueur chacune et de même section que la première, avec laquelle elles seront à angle droit, compléteront le réseau. Elles auront une pente, dirigée vers la galerie principale, de 1 mètre par 1,500 mètres. On pourra les développer, si cela était nécessaire, mais on compte que le système tel quel fournira une suffisante quantité d'eau, car on évalue le débit à 80,000 hectolitres par jour, ce qui représente environ 100 litres par habitant, en sus des ressources déjà existantes. »

Fontaine de Vaucluse. — Il existe dans la nature diverses sources ou fontaines importantes et célèbres, provenant du drainage naturel des terrains perméables. Ainsi que nous l'avons déjà dit, l'existence de pareilles fontaines trouve son explication uniquement dans la constitution géologique du pays. Nous en donnerons deux exemples :

1° Le mont Ventoux, qui se dresse dans le département de Vaucluse, s'élève à l'altitude de 1,960 mètres ; sa base est une ellipse dont le grand axe, dirigé de l'est à l'ouest, a 25 kilomètres de long et le petit axe, dirigé du nord au sud, a 7,500 mètres, ce qui donne une superficie de 15,000 hectares. Le Ventoux est un massif calcaire éminemment perméable (terrain néocomien) ; sa surface n'est point ravinée et il absorbe une grande quantité de l'eau qu'il reçoit. A sa base, on ne trouve qu'une source importante, c'est la source du Groseau, à l'ouest, qui indique le niveau de l'assise imperméable qui supporte le massif calcaire : cette assise est donc inclinée de l'est à l'ouest et creusée en forme de vallée, puisque les eaux ne s'écoulent que par un seul orifice. Il tombe environ $0^m,85$ de hauteur de pluie sur la surface du Ventoux, ce qui correspond à un débit de 4 mètres cubes à la seconde pour la superficie entière. Le débit des sources est à peu près

de 2 mètres cubes ; elles représentent donc à peu près la moitié de la pluie tombée.

2° De même, la fontaine de Vaucluse n'est que l'exutoire d'un vaste bassin de calcaire néocomien de 70 kilomètres de longueur, qui s'étend jusqu'à Sisteron, sur une superficie de 96,500 hectares. C'est un plateau élevé sur lequel il tombe 0m,80 environ de pluie par an, ce qui représente pour la superficie totale un débit de 24 mètres cubes à la seconde.

La fontaine de Vaucluse donne un débit de 10 à 12 mètres cubes, c'est-à-dire environ la moitié du cube de l'eau de pluie que recueille le bassin.

L'allure du débit des sources est intimement liée à l'épaisseur de la couche filtrante que les eaux pluviales ont à parcourir : si la couche filtrante est mince, les sources seront très-sensibles à la sécheresse et présenteront un débit essentiellement variable ; si la couche est épaisse, comme la circulation de l'eau y est fort ralentie, l'influence de la sécheresse met beaucoup de temps à se faire sentir, les sources sont pérennes et régulières.

On trouve bien des exemples de drainage naturel dans les tranchées qu'on ouvre pour des routes ou des chemins de fer ; au-dessus de chaque assise argileuse se présente un niveau d'eau dont il faut recueillir les suintements pour les empêcher de dégrader les talus.

Distribution d'eau de Hagueneau. — La ville de Hagueneau est dominée à l'ouest par le coteau de Bellevue ; ce coteau est formé d'une couche de sable diluvien reposant sur de l'argile tertiaire qui se relève brusquement du côté de la vallée de la Moder ; les eaux d'infiltration sont donc arrêtées et maintenues dans le sable par le bourrelet argileux qui se relève sur le flanc du coteau.

Pour les recueillir, on avait établi, en 1733, une conduite souterraine en pierre de taille, formée d'une cuvette de 0m,18 de profondeur et 0m,32 de large, recouverte par des dalles de 0m,08 d'épaisseur ; cette conduite, de 200 mètres de longueur, n'est point maçonnée, et les eaux qu'elle reçoit sont amenées dans un réservoir en maçonnerie, où vient les prendre une conduite en fonte. Cette conduite passe aujourd'hui en siphon sous la ligne des chemins de fer de l'est.

Lorsqu'on a ouvert la tranchée du chemin de fer, on a coupé le bourrelet argileux, on a donné un écoulement vers la Moder à l'eau d'infiltration de la masse sableuse, et, la sécheresse aidant, en 1857, les fontaines sont venues à tarir.

M. l'ingénieur Pugnières leur a rendu de l'eau en prolongeant l'ancien drainage de 402 mètres avec des tuyaux ordinaires de drainage, de 0m,10 de diamètre intérieur, posés dans des tranchées de 2 mètres à 2m,50 de profondeur. Les tuyaux de drainage sont chanfreinés à leurs extrémités, ils reposent sur une aire de glaise de 0m,10 d'épaisseur, et les joints sont préservés de l'introduction du sable par un bourrelet de glaise de 0m,05, fortement pilonné.

Il se développe dans ces conduites des végétations abondantes ; aussi s'est-on ménagé la possibilité d'un fréquent nettoyage en plaçant des regards à tous les changements de direction et tous les 50 mètres dans les parties rectilignes.

Le travail est revenu à 2 fr. 75 c. le mètre courant.

Il est donc facile en le développant de satisfaire à tous les besoins.

CITERNES

L'usage des citernes, assez répandu en Hollande et en Allemagne, ne l'est guère en France; les citernes sont cependant susceptibles de rendre de grands services dans les pays dépourvus d'eau, où les puits sont profonds et de faible puissance.

Les citernes sont alimentées par les eaux pluviales qui tombent sur les toits et que recueillent les gouttières.

A la suite d'une sécheresse un peu longue, il convient de ne pas laisser arriver à la citerne les premières eaux recueillies parce qu'elles entraînent les poussières et les matières organiques qui se sont déposées sur les toits; cette précaution est facile à prendre, il n'y a qu'à manœuvrer un robinet.

La construction des citernes est aujourd'hui simple et relativement peu coûteuse, grâce aux chaux hydrauliques et aux ciments dont on dispose; il importe que les parois soient imperméables afin que les eaux du sol, toujours impures dans le voisinage des habitations, ne pénètrent point dans la citerne. La citerne doit être voûtée et en partie enfouie dans le sol, pour que l'eau se tienne fraîche et échappe à la gelée; les terres de la fouille seront employées à contre-buter les murs latéraux et à recouvrir la voûte.

L'eau se clarifie dans la citerne; les matières lourdes tombent au fond, les matières légères viennent à la surface, le tuyau d'aspiration de la pompe doit déboucher à un niveau intermédiaire.

Il convient de ménager un grand accès à l'air dans les citernes; elles doivent donc être munies de soupiraux, et il ne serait point mauvais d'en agiter de temps en temps les eaux par un moyen mécanique; en effet, la fermentation des substances organiques se développe toujours dans une eau stagnante, et si elle ne se fait point à l'aide de l'oxygène de l'air, elle prend celui des sulfates qu'elle décompose en dégageant de l'acide sulfhydrique; l'eau devient infecte et impropre à l'alimentation.

Si l'eau de citerne n'est pas agréable à boire, c'est en somme une eau douce qui rend de grands services pour les usages domestiques et pour la cuisson des légumes. On peut aller chercher au loin ou dans un puits profond l'eau qui sert à la boisson, et recourir pour tout le reste à l'eau de la citerne.

Un propriétaire qui voudrait disposer de 500 litres d'eau par jour, dans un pays où la hauteur de pluie annuelle est de 1 mètre, devrait recueillir par des gouttières l'eau qui tombe sur 180 mètres carrés, et construire une citerne de 180 mètres cubes, soit 3 mètres de profondeur, 15 mètres de long et 4 mètres de large. C'est, en somme, une assez faible dépense pour un grand avantage, et il est étonnant que l'usage des citernes ne soit pas plus répandu dans certains pays. Il va sans dire que le calcul précédent est basé sur une moyenne et que, dans les grandes sécheresses, on pourra être conduit à ménager l'eau de la citerne.

Il convient de diviser les grandes citernes en deux ou plusieurs compartiments, afin de pouvoir vider, nettoyer et réparer l'un d'eux pendant que les autres restent pleins.

Il convient aussi de ménager à la partie haute des citernes un déversoir ou trop plein pour l'écoulement des eaux surabondantes.

Citernes filtres de Venise. — A Venise, où l'on comprend bien que l'usage des citernes est très-répandu, l'eau pluviale est répartie à la surface d'une excavation remplie de sable, où cette eau pénètre. La partie centrale de l'excavation est occupée par un puits dont les parois en brique sont imperméables, si ce n'est à la partie basse où elles sont percées de trous. C'est dans ce puits central que plonge le tuyau d'aspiration de la pompe.

Le sable qui entoure le puits est placé, avons-nous dit, dans une excavation du sol; les parois de l'excavation sont maintenues par une carcasse en charpente en avant de laquelle est appliqué un bon corroi en argile.

On réalise de la sorte tout à la fois le filtre et la citerne.

PUITS ORDINAIRES

Les puits sont d'un usage général; on les rencontre dans toutes les maisons de quelque importance. Ils sont dans beaucoup de pays le seul mode d'alimentation en eau potable.

Nous ne dirons rien de la manière dont on doit les construire; on trouvera à cet effet tous les détails nécessaires dans notre *Traité de la construction des souterrains*. Nous ferons remarquer seulement qu'on a fréquemment à forer les puits dans des roches calcaires relativement tendres, et qu'il conviendrait de substituer à l'ancien fleuret à main les tarières à manivelle, qui donnent un travail rapide et économique.

Les eaux de puits tiennent en dissolution les matières minérales de la couche de terrain dans laquelle elles prennent naissance; elles sont quelquefois lourdes à digérer et trop chargées de calcaire ou de sulfate de chaux; elles ont l'avantage de la fraîcheur et constituent une boisson agréable.

Insalubrité des puits des villes. — Malheureusement, dans les villes l'eau des puits se corrompt rapidement et cesse d'être potable.

« En effet, dit M. de Freycinet dans son *Traité de l'assainissement industriel*, diverses causes tendent à altérer la qualité des eaux. Premièrement, les matières organiques répandues à la surface du sol, et provenant soit des maisons, soit du mouvement de la rue, s'infiltrent peu à peu dans le sol et même à travers les joints des pavés.

Les eaux pluviales agissent incessamment pour les faire pénétrer davantage et finissent par les amener au contact des sources souterraines. En second lieu, les égouts, les fosses d'aisances, les fosses à fumier, les puisards et autres dépôts d'ordures, qui sont situés à une certaine profondeur, livrent passage à des infiltrations d'autant plus promptes à s'étendre qu'elles ne rencontrent pas devant elles un sol battu ou empierré comme à la surface. D'autre part, les cimetières, quand il en existe à proximité des villes, constituent pour les puits un voisinage des plus dangereux; car le terrain où se décomposent les cadavres, constamment remué par l'ensevelissement, est très-perméable aux eaux superficielles et leur abandonne des éléments organiques de la pire espèce. Une autre cause très-énergique et très-générale d'infection réside dans les conduites du gaz de l'éclairage, dont les fuites imprègnent peu à peu le sol de produits fétides et finissent par former une couche noirâtre qui s'étend sous l'emplacement entier des villes. Il est à peu près impossible aujourd'hui que les eaux superficielles

pénètrent dans les profondeurs du terrain sans avoir traversé sur quelque point cette couche impure. Enfin une foule de substances d'origines diverses sont introduites journellement dans le sol, par suite de circonstances qu'il serait trop long d'énumérer. Les villes situées, par exemple, dans le voisinage d'exploitations souterraines sont exposées à ce que les couches sous-jacentes soient envahies par les liquides ou les gaz impurs qui proviennent de ces exploitations. Les opérations industrielles engendrent également de graves phénomènes de corruption.

Sans parler des résidus que les fabriques écoulent incessamment, les réceptacles dans lesquels elles conservent leurs produits et qui consistent fréquemment en citernes ou réservoirs creusés dans la profondeur du sol, donnent lieu à des filtrations plus ou moins étendues.

Dans un autre ordre d'idées, on doit citer deux causes d'altération des eaux, qui tiennent non à la présence de telle ou telle espèce de matière, mais aux conditions inhérentes à l'existence même des villes.

L'une de ces causes est le manque d'oxygène atmosphérique dans l'intérieur du sol. On sait, en effet, que cet oxygène est indispensable à la salubrité des eaux souterraines, soit pour les aérer, soit pour brûler les substances organiques qui ont pénétré dans leur voisinage et qui, faute d'oxygène, engendrent les phénomènes connus de réduction des sulfates avec le dégagement d hydrogène sulfuré qui en est la conséquence. Or, dans les villes, deux circonstances majeures contribuent à empêcher la pénétration de l'air atmosphérique. D'une part, la plus grande partie de la surface étant bâtie, pavée et empierrée, et en tous cas fortement battue par la circulation, l'air extérieur a évidemment beaucoup moins d'accès dans le sol. D'autre part, le fer détaché des roues de voiture et des fers des chevaux, à cause précisément de sa grande division, s'oxyde avec une extrême facilité et dès lors arrête l'oxygène au passage, et en même temps le fer, qui s'est sulfuré au sein de la terre et des eaux non aérées, par suite de la décomposition des sulfates, a également une grande tendance à absorber l'oxygène gazeux, et agit par suite dans le même sens.

La seconde cause d'altération des eaux résulte de l'absence de lumière solaire. Le contact de cet agent exerce, on le sait, une très-grande influence sur la combustion lente des substances organiques. C'est ce que prouvent, notamment, la conservation des matières colorantes, quand elles sont mises à l'abri de la lumière, et la destruction de ces mêmes matières, même à l'état solide, quand elles y sont, au contraire, exposées au sein de l'atmosphère. Or, il est évident que la circonstance physique générale qui s'oppose à l'introduction de l'air dans le sol, s'oppose également à l'arrivée de la lumière. Il y a plus; c'est que la lumière est interceptée en bon nombre de cas où l'air peut pénétrer. Tel est le cas, par exemple, des caves et des allées de maisons, où le sol n'est point pavé ni dallé; l'oxygène y trouve toujours quelques facilités pour s'introduire, tandis que les rayons solaires en sont bannis absolument. Il en est de même de beaucoup de hangars et ateliers où le sol est plus ou moins pénétrable à l'air, tandis que la lumière est arrêtée par les objets qui les garnissent.

Des diverses causes d'insalubrité que nous venons d'énumérer, les unes peuvent être combattues avec succès; les autres, dans l'état présent de nos connaissances, ne le sont qu'imparfaitement ou même ne le sont pas du tout. On n'a, par exemple, aucun moyen d'empêcher les eaux sales circulant à la surface de pénétrer dans le sol, car aucun mode de pavage ou d'empierrement actuellement en usage ne supprime les joints ou fissures. De même, on n'est pas encore parvenu

à éviter les fuites du gaz; à la vérité, on a indiqué des procédés dans ce but; mais certains, seraient tout à fait inefficaces, et quant aux autres, les difficultés d'exécution ou le coût de la dépense se sont jusqu'ici opposés à leur adoption. Bref, il existe et il existera vraisemblablement toujours, des causes puissantes d'infection qui, dans l'enceinte des cités populeuses, tendront à agir sur les puits. On ne peut donc pas compter sur eux pour une alimentation régulière. Dans les villes mêmes où des circonstances géologiques particulièrement favorables garantissent la pureté des nappes souterraines, les puits n'offrent qu'une ressource insuffisante, car s'ils fournissent l'eau potable et même celle des usages domestiques, ils ne sauraient donner celle que réclament la propreté de la maison, les opérations industrielles et surtout le service de la voirie. Ainsi, les localités qui ont l'avantage de posséder de bons puits ne sont pas pour cela dispensées de recourir à d'autres eaux.

Mais si le rôle des puits est destiné à s'effacer de plus en plus dans l'alimentation, ils sont, par contre, susceptibles de rendre quelques services comme moyen d'assainissement des villes. Il est évident, en effet, que par l'appel incessant qu'ils font des eaux autour d'eux, ils favorisent, dans les interstices du sol, la circulation et des eaux et de l'air. Tout filet d'eau qui s'écoule est inévitablement remplacé par un filet d'eau égal ou par un pareil volume d'air; dès lors, il se produit dans le sol un renouvellement qui tend à prévenir la fermentation putride des matières organiques. Ce qui le montre au surplus, c'est que très-souvent les puits, dans les premiers temps qui suivent leur creusement, ne donnent pas de bonne eau potable, tandis qu'à la longue cette eau s'améliore et finit par devenir tout à fait salubre : preuve que les matières altérantes situées dans le voisinage du puits ont été graduellement détruites ou entraînées par suite du renouvellement de l'eau. Nous remarquons en ce qui concerne les puits, que leur efficacité est subordonnée à deux conditions principales. La première, c'est que l'eau soit extraite du puits fréquemment, sans quoi le renouvellement n'est pas assez sensible; en d'autres termes, le puits doit être en service régulier comme moyen alimentaire. En second lieu, la nappe d'approvisionnement doit être en relation avec la surface, soit par l'intermédiaire de fissures ou d'interstices, soit par suite de la perméabilité des roches; car, si le déplacement de l'eau s'exerce dans une région indépendante des couches superficielles, les phénomènes d'assainissement pourront bien, à la vérité, s'exercer au profit du puits considéré comme moyen d'alimentation, mais non au profit du sol même, qui supporte les maisons. Malheureusement cette seconde condition est bien souvent incompatible avec celles qui font la bonne qualité des eaux; en sorte qu'on ne peut pas espérer de grands services, pour la salubrité, précisément des puits dont on use le plus pour les besoins domestiques. Les puits appelés à agir sur la salubrité du sol sont donc surtout ceux qu'on affecte à l'arrosage des jardins et à des opérations industrielles, car ceux-là peuvent être en service fréquent, tout en ne fournissant pas de très-bonne eau potable. Mais, il faut bien le reconnaître, le rôle de plus en plus effacé des puits dans l'approvisionnement des villes tend par là même à diminuer beaucoup leur influence sur l'assainissement. Ce n'est guère que dans les petites localités qu'ils pourront continuer à garder de l'importance. »

Puits instantanés. — Il existe souvent à quelques mètres au-dessous du sol des eaux abondantes, provenant de l'infiltration soit des eaux pluviales soit des eaux d'une rivière voisine. Néanmoins, il n'est pas facile avec les procédés ordinaires d'arriver rapidement jusqu'à ces eaux : le forage et le muraillement des

puits dans un sol plus ou moins vaseux et sablonneux sont des opérations longues, coûteuses et quelquefois dangereuses, même lorsqu'il ne s'agit que de faibles profondeurs.

Le puits instantané Norton supprime tous ces inconvénients. Il se compose, figure 23, d'un tube creux en fer, garni à son extrémité d'une pointe ou sabot, et percé à sa partie inférieure d'une certaine quantité de trous; on enfonce ce tube à l'aide d'un mouton ou d'un fort maillet à plusieurs branches, comme on le ferait pour un pieu ordinaire. Lorsque la pointe est arrivée à la profondeur voulue, on ajuste sur le sommet du tube vertical une petite pompe en fonte que l'on fait manœuvrer ; elle entraîne d'abord une eau boueuse et peu abondante, qui peu à peu s'éclaircit et finit par couler à plein tuyau.

En effet, l'aspiration qui se fait par les trous percés à la base du tube, entraîne les molécules terreuses adjacentes, et il se crée bientôt une poche ou cavité qui se remplit d'eau pure.

Le diamètre extérieur du tube est de $0^m,046$.

— intérieur . — $0^m,032$.

La surface totale des trous, percés sur une hauteur de $0^m,70$ est égale à une fois et demie la section intérieure du tube.

Le premier tube a $3^m,50$ de longueur, mais il est facile de l'allonger au moyen d'autres tubes de chacun un mètre de long, taraudés à une extrémité et filetés à l'autre de façon à s'emboîter et à se réunir les uns aux autres.

Pour enfoncer le tube, on le serre au moyen de deux écrous dans un collier *a*, dont la gorge intérieure est filetée afin de bien adhérer au tube, et on frappe sur le collier au moyen d'un mouton *b* disposé comme l'indique la figure ; ce mouton est creux et traversé par le tube qui le guide dans son mouvement.

Ce système spécial convient bien aux armées en campagne ou dans les exploitations où l'on est exposé à changer fréquemment le puits de place.

Fig. 23.



Fig. 24.

Lorsqu'on voudra poser un puits instantané à demeure fixe, on pourra enfoncer le tube à l'aide d'un fort mouton en bois ou d'un petit mouton en fer frappant sur un collier qui entoure et protége la tête du tube.

Nous le répétons, ce puits est très-avantageux à établir dans les vallées d'alluvion : nous en avons construit un qui a parfaitement réussi.

Un puits instantané de 3 mètres de profondeur avec sa petite pompe en fonte peut revenir à 125 francs et un puits de 9 mètres à 250 francs.

Il est à remarquer que dans certains cas on pourra obtenir par le procédé que nous venons de décrire une eau jaillissante.

THÉORIE DES PUITS

La théorie mathématique des puits ordinaires et des puits artésiens n'a guè été traitée que par Dupuit et Darcy. C'est d'après eux que nous en donnerons les principaux traits.

Nous ne nous occuperons que des puits alimentés par des couches perméables, et non point de ceux qui peuvent tirer leurs eaux de courants souterrains circulant dans les cavités intérieures du sol ; nous aurons l'occasion plus loin de donner quelques détails sur ces courants.

Écoulement à travers un terrain perméable. — Le point de départ de la théorie des puits est la loi qui règle l'écoulement de l'eau à travers un terrain perméable. En abordant la question du filtrage, nous avons rapporté les expériences de Darcy sur l'écoulement de l'eau à travers le sable.

Pour un terrain perméable donné, le volume (q) débité par mètre carré est *proportionnel à la charge* (h) *et en raison inverse de l'épaisseur* (e) *de la couche traversée.*

D'où l'expression :

$$q=k\frac{h}{e}$$

la fraction $\left(\frac{h}{e}\right)$ n'est autre que la perte de charge j par mètre de parcours de l'eau à travers la couche perméable ; le débit q par mètre carré est évidemment proportionnel à la vitesse u d'écoulement. Donc l'équation précédente peut se mettre sous la forme :

(1) $$j=\mu . u$$

dans laquelle μ est un nombre constant, qui dépend de la porosité de la couche perméable ; à la page 72 nous avons calculé diverses valeurs de ce coefficient.

Calcul d'un puits ordinaire. — Considérons un massif sablonneux *cdef* limité à un cylindre vertical et entouré d'eau de toutes parts ; au centre de ce massif on perce un puits *ab* (fig. 25). Le massif repose sur une couche imperméable et la hauteur d'eau qui le baigne de toutes parts est égale à H. Si l'on ne tire point d'eau du puits, l'équilibre hydrostatique s'établit et le niveau d'eau s'élève dans ce puits jusqu'à l'horizontale *cd*, c'est-à-dire à la hauteur H.

Si l'on vient maintenant à extraire du puits un volume q par seconde, il faudra, pour l'alimentation, qu'un courant s'établisse de la périphérie au centre du massif filtrant ; la production de ce courant entraîne une perte de charge, une chute du liquide, et la surface du liquide en mouvement dans le sable se rappro-

chera d'un tronc de cône ayant pour grande base le cercle de diamètre *cd* et pour petite base le cercle de diamètre *ab*. La section méridienne donnera pour la

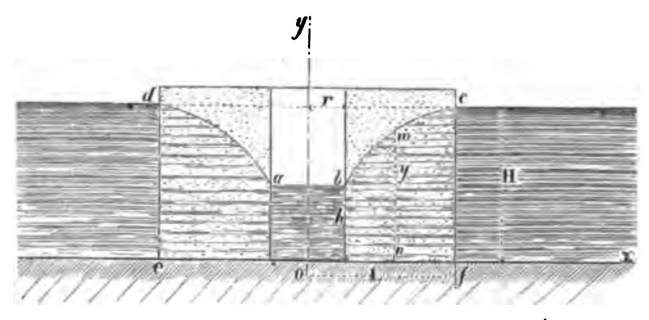


Fig. 25.

surface de l'eau une courbe telle que *bc* ; à mesure que le débit q, exigé du puits, augmentera, la courbure de *cb* s'accentuera et le point *b* descendra dans le puits.

Désignons par L le rayon du massif filtrant et par r le rayon du puits ; ce dernier est généralement très-faible par rapport au premier.

Prenons pour axes de coordonnées oy et ox ; au point m de la nappe souterraine, quelle est la valeur de la perte de charge j par mètre courant ?...

Lorsqu'on passe du point m au point voisin, la chute est égale à dy et le chemin parcouru est égal à dx, donc

$$j=\frac{dy}{dx}$$

et l'équation (1) devient :

$$\frac{dy}{dx}=\mu.u \tag{2}$$

Considérons, d'un autre côté, une section cylindrique du massif, section ayant pour axe l'axe du puits et pour génératrice la verticale mn ; désignons par m le rapport du vide au plein que présente le massif sablonneux ; le débit de la nappe souterraine suivant la section cylindrique précédente sera représenté par $2.m.\pi.x.y.u$, et, comme le débit doit compenser le volume q que l'on retire du puits, nous avons l'équation :

$$2m\pi xyu=q \tag{3}$$

Éliminant u entre les équations (2) et (3) nous trouvons, pour l'équation différentielle de la courbe bc l'expression :

$$\frac{dy}{dx}=\frac{\mu}{2m.\pi}\cdot\frac{q}{xy} \quad \text{ou} \quad (4)\ 2ydy=\alpha.q.\frac{dx}{x}$$

Le nombre α représente la quantité constante $\frac{\mu}{m.\pi}$.

Il est facile d'intégrer l'équation (4), car $(2ydy)$ est la dérivée de (y^2) et $\left(\frac{dx}{x}\right)$ est la dérivée du logarithme népérien de x.

En outre,

$$y=h \quad \text{pour} \quad x=r$$
$$y=H \quad \text{pour} \quad x=L$$

ce qui nous donne :

(5) $$\begin{cases} y^2-h^2=\alpha.q.\ \log.\dfrac{x}{r} \\ y^2-H^2=\alpha.q.\ \log.\dfrac{x}{L} \end{cases}$$

L'équation de la courbe est donc de la forme :

(6) $$\frac{y^2-h^2}{H^2-h^2}=\frac{\log.\dfrac{x}{r}}{\log.\dfrac{L}{r}}$$

et, en retranchant l'une de l'autre les deux équations (5) on trouve pour le débit :

(7) $$q=\frac{H^2-h^2}{\alpha}\cdot\frac{1}{\log.\left(\dfrac{L}{r}\right)}$$

L'équation (6) ne renferme ni q ni α, la courbe est donc indépendante du débit du puits et de la porosité de la couche perméable ; elle ne dépend que des hauteurs d'eau à l'extérieur dn massif et dans le puits, ainsi que du rayon du puits et de la largeur du filtre.

Quant au débit q, il varie non-seulement avec les quantités précédentes, mais encore avec le coefficient α, c'est-à-dire avec la porosité du sol.

Ce débit q est proportionnel à $(H^2 - h^2)$ ou à $(H-h)$ $(H+h)$, c'est-à-dire qu'il est proportionnel à la charge $(H-h)$ et à l'épaisseur moyenne $\left(\frac{H+h}{2}\right)$ de la couche filtrante.

Lorsque le diamètre du puits et l'étendue L de la couche filtrante varient proportionnellement, le débit ne change pas.

Peu d'influence du rayon du puits. — L'équation (7) nous apprend que le débit varie en raison inverse log. $\frac{L}{r}$ ou de log. L — log. r ; il augmente donc avec le rayon du puits ; mais contrairement à l'opinion courante, contrairement à ce qu'on est tenté de croire au premier abord, l'augmentation de débit est très-faible eu égard à l'augmentation du rayon, dès que la largeur L de la couche filtrante atteint une valeur notable, cas ordinaire dans la nature.

Généralement, quelle que soit la valeur de r, elle est toujours faible par rapport à L.

Prenons $L=100^m$, et $r=1^m$, si nous doublons le rayon du puits, le nou-

veau débit q' sera à l'ancien débit q, dans le rapport :

$$\frac{q'}{q}=\frac{1-\log\left(\frac{r}{L}\right)}{1-\log\left(\frac{2r}{L}\right)}$$

ce qui donne, grâce aux tables de logarithmes népériens :

$$q'=1,17.q$$

Il ne faut donc pas chercher à donner aux puits des diamètres plus grands que ceux qui conviennent à un travail facile et à une bonne installation des machines élévatoires.

Ce résultat, qui paraît bizarre au premier abord, n'a rien d'étonnant si on réfléchit que, la charge étant constante et l'épaisseur de la couche filtrante à traverser par les eaux étant sensiblement constante aussi, puisqu'elle est très-grande par rapport au rayon du puits, la puissance de débit de cette couche est nécessairement limitée comme l'est celle du filtre en pierre de nos fontaines domestiques. Tout le monde sait que, pour obtenir une plus grande quantité d'eau filtrée, il est parfaitement inutile d'augmenter le nombre des robinets, la surface de la pierre poreuse ne laissera toujours passer que la quantité d'eau, qui correspond à son épaisseur et à la charge qui la surmonte.

Le calcul précédent suppose que le puits est foncé jusque sur l'assise imperméable,et qu'il n'est alimenté que par sa paroi latérale ; s'il n'en est pas ainsi, l'alimentation se fait aussi par le fond, et le débit peut alors augmenter avec la section horizontale du puits. Néanmoins, l'augmentation n'est pas très-rapide.

Sans attacher aux indications théoriques précédentes une valeur considérable, on doit les considérer comme peu éloignées de la vérité.

Définition du puits artésien. — Bien que la définition des puits artésiens soit connue, il convient de la préciser ici.

Les assises successives qu'on rencontre en descendant le sol sont tantôt perméables, tantôt imperméables ; elles ont été courbées et redressées par le soulèvement des montagnes. Les assises soulevées apparaissent au jour sur les flancs des montagnes qui les ont déchirées, et ce sont les plus anciennes qui se trouvent le plus près des lignes de faîte.

Considérons figure 26, une assise perméable *b* comprise entre deux assises imperméables *a* et *c* ; les eaux pluviales qui tombent sur l'affleurement de la couche *b*, s'infitrent et tendent à descendre au point le plus bas de la cuvette, elles sont toujours maintenues entre les deux couches *a* et *c*, qui forment comme les parois d'une immense conduite forcée.

Si l'on vient, par un forage vertical *mn* à percer l'assise *a* et à pénétrer dans la couche aqueuse *b*, l'eau s'élèvera dans le tube piézométrique *mn* jusqu'à l'altitude *xx* de l'affleurement de l'assise perméable *b* ; si l'on vient à couper le tube piezométrique en *m*, la perte de charge *mx* se traduira par une production de vitesse, un courant s'établira dans la couche filtrante *b* et dans le tube vertical *mn*.

On aura un puits artésien, dont le débit dépendra de la hauteur *mx* que l'on aura enlevée au tube piézométrique.

S'il existe au-dessous de l'assise imperméable *c* une nouvelle couche filtrante *d*, dont l'affleurement est en *y* et qu'on descende jusqu'à cette couche un tube

vertical, l'eau s'élèvera jusqu'à un niveau piézométrique *yy*, et si le tube est coupé en *p*, un courant s'établira dans la couche *d* et dans le tube *pq*.

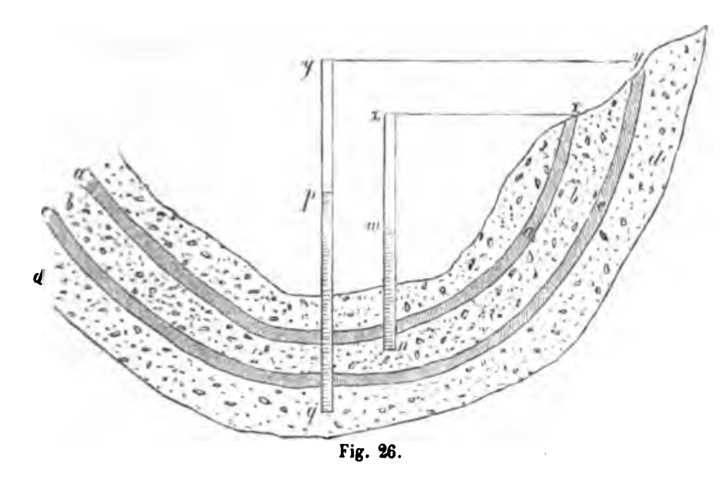


Fig. 26.

Ce courant pourra être plus puissant que le courant *mn* et posséder un niveau piézométrique plus élevé, mais cela n'est pas certain, et on n'est pas toujours assuré de trouver un plus grand débit en descendant plus profondément.

Théorie du puits artésien. — Nous allons présenter, d'après Dupuit, la théorie du puits artésien, théorie analogue à celle des puits ordinaires. Nous désignons par L la largeur de la nappe perméable qui entoure le puits, *r* le rayon du puits, *e* l'épaisseur moyenne de la couche perméable, H la hauteur

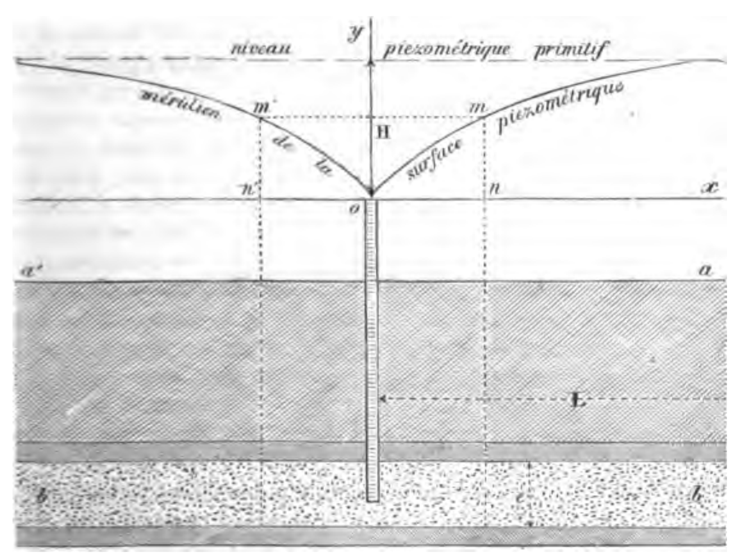


Fig. 27.

à laquelle est coupé le tube artésien au-dessous du niveau piézométrique, c'est-à-dire du niveau auquel l'eau s'élèverait dans un tube indéfini.

Nous prenons pour axes de coordonnées l'horizontale *ox* et la verticale *oy*.

Quand le tube artésien est coupé en *o*, l'eau s'écoule avec une certaine vitesse, le courant souterrain se creuse comme un entonnoir dont le puits serait le centre, et dont la ligne méridienne serait une courbe telle que *om*, se raccordant à une distance plus ou moins considérable, avec l'horizontale du niveau piézométrique primitif.

Considérons la section faite dans la couche filtrante *bb* par le cylindre vertical, dont les génératrices sont *mn m'n'* et désignons par *u* la vitesse d'écoulement de l'eau, qui traverse la périphérie de ce cylindre.

m est le rapport du vide au plein dans la couche considérée, c'est-à-dire le rapport dans lequel il faut réduire la section totale pour avoir la section d'écoulement.

Lorsqu'on passe du point *m* à un point voisin, la perte de charge est *dy* et l'intervalle parcouru *dx*, la perte de charge *j* par mètre courant est donc la limite du rapport $\left(\frac{dy}{dx}\right)$, et d'après l'équation (1) de la page 124, nous avons :

$$\frac{dy}{dx} = \mu . u$$

Si *q* est le débit par seconde, la vitesse *u* du liquide qui traverse la surface cylindrique *mn m'n'* est égale à

$$\frac{q}{m.2\pi.e.x}$$

donc :

$$dy = \frac{\mu}{2m\pi} \cdot \frac{q}{e} \cdot \frac{dx}{x}$$

Si l'on intègre cette équation, en remarquant que : pour $x = r$, $y = o$ et que pour $x = \mathrm{L}$, $y = \mathrm{H}$, on trouve

$$y = \frac{\mu}{2m\pi} \cdot \frac{q}{e} \log. \left(\frac{x}{r}\right)$$

$$y - \mathrm{H} = \frac{\mu}{2m\pi} \frac{q}{e} \log. \left(\frac{x}{\mathrm{L}}\right)$$

Divisant ces deux équations l'une par l'autre, il vient :

(1) $$y = \mathrm{H} \frac{\log. x - \log. r}{\log. \mathrm{L} - \log. r}$$

(2) $$q = \frac{2\pi me}{\mu} \frac{\mathrm{H}}{\log. \left(\frac{\mathrm{L}}{r}\right)}$$

D'après l'équation (1) la courbe des niveaux piézométriques ne dépend ni du débit, ni de l'épaisseur de la courbe filtrante, ni de sa perméabilité.

D'après l'équation (2) le débit est proportionnel à l'épaisseur de la couche filtrante, à sa perméabilité et à la charge, c'est-à-dire à la dénivellation qui existe entre l'orifice du tube artésien et la hauteur piézométrique primitive.

La proportionnalité du débit et de la charge a été démontrée par plusieurs expériences.

Le débit est en raison inverse de la différence des logarithmes de L et de r; le rayon r est toujours petit par rapport à la largeur L de la couche filtrante; son logarithme peut donc être négligé en présence du logarithme de L, ce qui conduit à dire que le débit d'un puits artésien *est indépendant du rayon de ce puits.*

Il va sans dire que ce résultat, en l'admettant comme exact, ne saurait être appliqué à des tubes de très-petit diamètre, car ces tubes offrent au mouvement ascendant de l'eau une résistance considérable qui influe sur le débit.

Perte de charge totale. — Il est, du reste, facile d'apprécier la diminution que la résistance du tube vertical apporte dans le débit.

Soit l la profondeur du puits artésien; la formule (5) de la page 14 nous apprend que la perte de charge produite par les frottements dans le tube de rayon r et de longueur l est égale à

$$\frac{b_1 q^2 l}{\pi^2 . r^5};$$

cette perte de charge vient en diminution de la charge H qui produit l'écoulement dans le puits artésien, et l'équation (2) doit s'écrire :

$$(3) \qquad q = \frac{2\pi . m . e}{\mu} \frac{1}{\log . \frac{L}{r}} \left(H - \frac{b_1 q^2 l}{\pi^2 r^5}\right)$$

Pour calculer la valeur de q, on prendra d'abord celle que donne l'équation (2) et on la substituera dans le second membre de l'équation (3), ce qui donnera une valeur plus approchée du débit. En général, cet essai suffira, car la perte de charge due au mouvement dans le tube vertical est très-faible par rapport à la charge totale H.

Importance pratique des grands diamètres pour les puits artésiens. — La théorie précédente nous conduit à penser que le débit des puits artésiens n'augmente guère avec le diamètre de ces puits, pourvu toutefois que ce diamètre ne soit pas assez petit pour entraîner des frottements considérables.

En réalité, la théorie n'est pas toujours confirmée par les faits : le puits de Passy a donné un débit bien supérieur à celui du puits de Grenelle ; il est vrai que l'augmentation de débit s'explique, suivant Darcy et Dupuit, par ce fait qu'on est allé chercher une couche filtrante plus profonde et plus épaisse.

On peut se demander si la dénivellation piézométrique se fait sentir sur une grande étendue et si, en réalité, L est très-grand par rapport à r; cela n'est pas prouvé, bien que deux puits artésiens puissent influer sur leur débit réciproque, même à grande distance.

La théorie précédente peut encore être attaquée par cette considération qu'il se forme presque toujours, à la base du tube artésien, une vaste poche, une excavation, une sorte de réservoir alimenté par une couche filtrante ; la courbe des niveaux piézométriques diffère donc de celle que nous avons considérée.

En outre, il existe dans les terrains perméables de véritables courants circulant dans des conduites fermées et irrégulières, et il peut arriver qu'un puits artésien rencontre un courant de ce genre, ce qui modifie profondément les lois de l'écoulement.

Quoi qu'il en soit, la théorie que nous avons donnée n'est pas absolument

vérifiée par l'expérience; elle paraît vraie néanmoins, car on peut expliquer par des circonstances particulières les anomalies qu'on rencontre.

En réalité, les praticiens n'ont pas adopté uniquement les petits diamètres; leur tendance est de recourir à des diamètres sans cesse croissants.

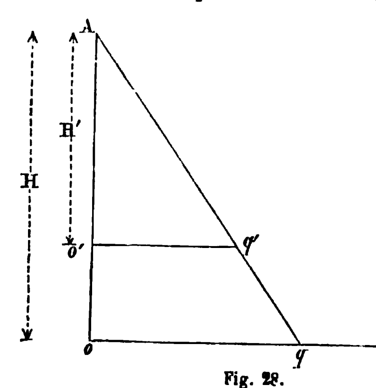


Fig. 28.

Il semble toutefois qu'en opérant ainsi, leur principal but est de rendre le travail plus facile et les accidents de tous genres, tels que les ruptures des instruments de sondage, moins pénibles à réparer.

Détermination du niveau piézométrique d'un puits artésien. — Il est facile par une simple construction graphique de déterminer le niveau piézométrique d'un puits artésien.

On coupe le tube artésien à une certaine altitude o (*fig.* 28), et on trouve expérimentalement un débit q; on le coupe ensuite à une autre altitude o' et on trouve un débit q'.

D'après la formule (2) ci-dessus, on doit avoir la relation :

$$\frac{q}{q'}=\frac{H}{H'}$$

On porte sur l'horizontale du point o une longueur mesurant le débit q, et sur l'horizontale du point o' une longueur mesurant le débit q'; on joint les extrémités q et q' des longueurs horizontales ainsi obtenues, et le point A où la droite qq' rencontre la verticale oo' est au niveau piézométrique cherché.

Ce niveau piézométrique n'est pas exact en général, car le tubage des puits artésiens est toujours très-imparfait; une partie de l'eau jaillissante monte entre l'extérieur des tubes et les parois du trou de sonde ; elle disparait dans les couches absorbantes; de même, il existe de nombreuses fuites et solutions de continuité dans la colonne tubulaire, et tout cela se traduit à la surface par une perte quelquefois considérable de débit, ce qui entraîne une réduction proportionnelle dans la valeur trouvée pour H.

La position du point A ne représente donc qu'un minimum du niveau piézométrique. C'est par des considérations géologiques et par l'examen des couches qu'a traversées le sondage qu'on peut déterminer d'une manière approximative le véritable niveau piézométrique.

Il est bon de déterminer de temps en temps la position de ce point A pour voir s'il ne s'abaisse point et si, par conséquent, quelques fuites nouvelles ne se manifestent point dans la colonne tubulaire.

Existence de courants souterrains. — L'existence de courants souterrains quelquefois considérables est mise en évidence par les faits suivants :

A $37^{m},50$ au-dessous du sol, dans un puits artésien, à la Villette, la sonde est tombée brusquement de $3^{m},50$, et le niveau d'eau ne s'est point abaissé, malgré l'action d'une machine d'épuisement de quarante chevaux.

Dans un puits de Tours descendu jusqu'aux sables verts, la nappe jaillissante a amené au jour des fragments d'épines et de graines, qui ont été semées et qui ont germé. S'il y avait eu simple filtration, ces matières solides n'auraient pas été entraînées.

Les eaux rencontrées dans les sables verts ramènent toujours des fragments de lignites, ainsi que des fossiles d'un volume quelquefois considérable.

Dans les forages, il y a souvent des chutes brusques de la sonde, et, lorsqu'on la relève, elle apparaît propre et claire, comme si elle avait été lavée dans un courant rapide.

L'existence de ce courant se manifeste du reste jusqu'à la surface par l'agitation et la trépidation que la sonde éprouve.

Constance du débit des puits artésiens. — Les puits artésiens profonds sont remarquables par la constance de leur débit.

Cette constance s'explique si l'on remarque que les puits de ce genre sont alimentés par les eaux pluviales qui s'infiltrent snr une grande étendue de pays; les variations dans les hauteurs de pluie tombées, en admettant qu'elles aillent du simple au double, peuvent s'évaluer au maximum à une hauteur d'eau de $0^m,50$; supposez une assise dont le coefficient de perméabilité soit de 0,20, la hauteur de pluie de $0^m,50$ représentera une hauteur d'eau de $2^m,50$ dans le sol.

La variation de la charge H sera donc au plus de $2^m,50$, proportion généralement insignifiante, qui n'influera pas d'une manière sensible sur le débit du puits.

Existence d'une poche à la base des puits artésiens. — Il se forme à la base des puits artésiens une poche qui peut atteindre un volume considérable.

Ainsi, il est sorti environ 1000 mètres cubes de sable du puits de Grenelle.

La formation de cette poche paraît même indispensable, dans certains cas, à la production de la nappe jaillissante: en 1830, on avait exécuté à Saint-Denis un sondage qui devait avoir dépassé le niveau des eaux jaillissantes, néanmoins le liquide ne s'élevait pas. On descendit une pompe à 60 mètres de profondeur et on la fit manœuvrer pour déterminer un appel; elle amena d'abord une eau très-mélangée de sable, puis la proportion de sable diminua et, tout d'un coup, l'eau fit irruption brusque et jaillit à travers les clapets; l'écoulement n'a pas cessé depuis.

Forage des puits artésiens. — Les procédés de sondage ont été exposés dans notre *Traité de l'exécution des Travaux*, auquel le lecteur voudra bien se reporter.

Les progrès de ces dernières années ont été considérables; on est descendu à des profondeurs inconnues jusque-là et l'on n'a pas craint d'exécuter des sondages de plusieurs mètres de diamètre.

DÉTAILS SUR QUELQUES PUITS ARTÉSIENS

Puits de Grenelle. — Les eaux du puits de Grenelle, comme celles des principaux puits artésiens forés dans le bassin de la Seine, proviennent des couches sablonneuses du grès vert, emprisonnées sous l'argile du gault. Cette argile est recouverte par la craie grise, au-dessus de laquelle se trouvent les assises de la formation tertiaire surmontées elles-mêmes par les terrains d'alluvion.

Le puits de Grenelle débouche à 37 mètres au dessus du niveau de la mer. Sa profondeur est de 549 mètres.

Les terrains d'alluvion ont $9^m,05$ d'épaisseur;

Jusqu'à $10^m,50$	on trouve	le sable et l'argile plastique.
— $40^m,63$	—	des nodules calcaires.
— $41^m,54$	—	la craie calcaire.
— $336^m,78$	—	la craie grise.
— $505^m,00$	—	le gault.
— $545^m,00$	—	sables verts.

Le puits pénètre à 4 mètres de profondeur dans les sables verts.

L'argile verte du gault, qui représente le couvercle imperméable du réservoir souterrain, affleure dans toutes les directions autour de Paris; on la trouve dans le voisinage des villes de Calais, Valenciennes, Sainte-Ménehould, Auxerre, Châtellerault, la Flèche, Nogent-le-Rotrou, Lisieux et Honfleur.

La ligne d'affleurement a plus de 300 kilomètres de développement; elle est coupée par les grandes vallées et son altitude varie de 100 à 200 mètres au-dessus du niveau de la mer; aux environs de Troyes, elle se trouve à 135 ou 140 mètres d'altitude. La largeur de la couche absorbante varie de 15 à 40 kilomètres.

Le forage du puits de Grenelle a été exécuté par M. Mulot; cette opération commença le 28 décembre 1833, et l'eau jaillissante apparut le 26 février 1841; le travail ne fut terminé que le 20 juillet 1852.

Bien des contre-temps et des accidents, habilement surmontés, entravèrent l'exécution du travail.

A 115 mètres de profondeur, les tiges de sonde se rompirent et, pour les dégager, il fallut exécuter un second sondage à côté du premier.

Le tubage définitif devait être exécuté en tuyaux de cuivre de $0^m,003$ d'épaisseur et de 0,17 à $0^m,24$ de diamètre; mais on s'aperçut qu'ils s'écrasaient sous la pression de l'eau extérieure; ils se crevèrent, et l'eau, se perdant dans les couches perméables, n'arrivait plus jusqu'au sol.

Il fallut déchirer et enlever par morceaux les tubes écrasés, et une commission décida qu'on poserait un tubage en tôle galvanisée.

Mais, dans l'intervalle, il s'était opéré des mouvements dans les assises traversées, le forage avait perdu sa verticalité, et il fallut percer l'ancien tube pour poursuivre le forage en ligne droite, avec des tubes en tôle de 5 millimètres d'épaisseur et de $0^m,12$ de diamètre intérieur.

La sonde vint à casser et en 1851 on dut en enlever les morceaux en même temps qu'on remonta le tubage précédent.

En somme, le tuyau d'aspiration a un diamètre très-variable, qui n'est que de $0^m,17$ sur les 129 derniers mètres.

Encore, comme la partie la plus basse tendait sans cesse à se déverser, on dut l'enraciner dans les couches inférieures résistantes au moyen d'un pieu en fer descendu dans le tube; l'eau n'arrive plus dans ce dernier que par les trous dont est percée la surface latérale, et la section d'écoulement se trouve réduite par la section quadrangulaire du pieu.

Néanmoins, après cette opération le débit augmenta plutôt qu'il ne diminua; c'est là un argument bien sérieux en faveur de la théorie qui nous a enseigné que le débit ne croissait pas sensiblement avec le diamètre du puits.

Le débit du puits de Grenelle était, en 1861, de 10 litres par seconde; lorsque le puits de Passy donna ses eaux le 25 septembre 1861, le débit du puits de

Grenelle tomba à 7 litres par seconde, ce qui se conçoit, car les deux puits sont en partie alimentés par la même couche.

Le niveau piézométrique du puits de Grenelle a été calculé par M. Mary, suivant la méthode indiquée plus haut, au moyen d'expériences sur le débit à diverses hauteurs.

Ce niveau se trouve à 128^{m},40 au dessus du niveau de la mer.

Puissance des sables verts. — Les sables verts ont un développement de 300 kilomètres, avec une largeur moyenne d'au moins 20 kilomètres.

En admettant qu'ils soient partout également perméables, et qu'ils absorbent 0^{m},25 de hauteur d'eau pluviale par an, ils pourraient alimenter près de 500 puits artésiens donnant un débit de 100 litres à la seconde, analogue au débit du puits de Passy.

Seulement, lorsque ces puits sont voisins et même à quelques kilomètres les uns des autres, ils se nuisent parce qu'ils exercent leur appel d'eau dans la même région de la couche filtrante, qui, semblable au filtre ordinaire de nos fontaines, ne peut donner que la quantité d'eau compatible avec sa surface et sa porosité.

Puits de Passy. — Au puits de Passy, dont la profondeur est de 586^{m},50, on a rencontré l'argile du gault à 523^{m},60 et à 577 les sables de la première nappe dans laquelle débouche le puits artésien de Grenelle ; le forage fut poussé plus profondément ; à 579^{m},50, on trouva une nouvelle couche d'argile qui fut percée, ce qui permit de rencontrer à 586^{m},50 une seconde couche de sable.

A Passy, l'eau fut rencontrée la première fois à 577^{m},50 ; mais, après quelques oscillations, elle s'arrêta à quelques mètres au dessous du sol ; on avait rencontré la nappe de Grenelle, qui se serait élevée à la même hauteur s'il n'avait pas existé quelque fuite dans le cuvelage.

Jusqu'à la profondeur de 550 mètres, on avait adopté, au puits de Passy, un cuvelage en bois de 0^{m},80 de diamètre intérieur ; les douves, soumises à la base à une énorme pression ont dû certainement se disjoindre peu à peu et laisser perdre, dans les assises perméables rencontrées, de grands volumes d'eau ; c'est en effet ce qu'indique la décroissance successive remarquée dans le débit.

On allongea le cuvelage en bois par un tube en tôle de 0^{m},70 de diamètre intérieur et de 0^{m},02 d'épaisseur ; le tube en tôle fut arrêté dans la dernière couche d'argile ; néanmoins, on continua le forage jusqu'à 586^{m},50, où l'on rencontra la nouvelle couche de sable aquifère.

L'eau jaillit le 24 septembre 1861 à midi ; le débit, qui atteignit d'abord 289 litres à la seconde, tomba le 28 septembre à 254 litres, le 1er octobre à 232 litres, à la fin d'octobre à 194 litres, et en novembre à 95 litres.

M. Kind, le sondeur allemand qui avait entrepris le puits de Passy, s'était engagé à donner un débit de 14,000 mètres cubes en 24 heures. Il comptait que le débit augmenterait rapidement avec le diamètre, et, prenant comme base le produit du puits de Grenelle, il trouvait qu'un forage de 0^{m},60 de diamètre pourrait donner jusqu'à 60,000 mètres cubes à l'heure. Son engagement lui laissait donc une grande marge.

Il a réussi à donner le volume d'eau qu'il avait promis ; mais le succès ne tient pas à la grandeur du diamètre, il tient à ce que le forage a été poussé plus profondément qu'à Grenelle et qu'on est allé chercher une couche plus jaillissante, plus puissante.

Ce qui prouve le bien fondé de l'explication précédente, c'est qu'à Elbœuf M. Mulot a exécuté plusieurs puits artésiens allant jusqu'aux sables verts ; il a

rencontré trois nappes jaillissantes ; la première, à laquelle semble correspondre le puits de Grenelle, a toujours été la plus faible.

Puits artésiens de Tours. — Les puits de Tours sont tous forés dans le même terrain ; leur profondeur ne varie que parce qu'ils ont été plus ou moins descendus dans la couche d'argile, grès et sables verts aquifères. Les sables verts supérieurs sont toujours plus ou moins argileux ; leur pureté et par suite leur perméabilité, augmente à mesure qu'on descend ; on rencontre donc des nappes de plus en plus abondantes.

La couche d'argile, grès et sables verts, a été explorée sur 60 à 80 mètres de hauteur ; les eaux sortent d'un sable coquillier renfermant de nombreux rognons de grès vert et une assez grande quantité de lignite.

Les premières sources se trouvaient quand on avait dépassé les argiles et les grès verts de 5 à 10 mètres ; ces sources, qui n'arrivaient qu'à la surface du sol, donnaient un débit de 2 à 3 litres à la minute ; à 15 ou 20 mètres plus bas, on trouvait des sources jaillissantes donnant 400 à 600 litres à la minute au niveau du sol ; enfin, lorsqu'on s'était engagé de 60 à 80 mètres dans le groupe des terrains, on a obtenu jusqu'à 3,000 litres d'eau à la minute au niveau du sol.

L'eau des puits de Tours est très-convenable pour les usages domestiques ; elle a une légère odeur sulfureuse et abandonne un dépôt rougeâtre ; elle renferme en effet un peu de barégine. Sa température est de 17° à 18°.

A mesure que le nombre des puits a augmenté, la mobilité de la couche aquifère a augmenté, il s'y est formé de nombreuses cavités et on a dû prendre des précautions pour maintenir le tubage.

Les sables verts, qui alimentent les puits de Tours, affleurent, dans le lit de la Loire du côté de Cosne, dans le lit du Cher près de Vierzon, dans les marais de la Brenne, dans les lits de l'Indre, de la Creuse, de la Vienne et de leurs affluents.

A mesure que le nombre des puits a augmenté, le débit de chacun d'eux a diminué.

Le ravinement de la bonne couche aquifère par les puits profonds détermine des éboulements des couches supérieures plus ou moins argileuses ; il en résulte quelquefois une diminution momentanée du débit d'un puits ; une eau boueuse et chargée vient au jour.

A mesure aussi que le nombre des puits forés s'est accru, le niveau piézométrique de chacun d'eux s'est abaissé.

Cela montre la dépendance réciproque de tous ces puits qui s'alimentent à la même nappe. Cette dépendance est vérifiée par d'autres faits :

Un jour, le débit d'un puits augmente de moitié sans cause apparente ; on apprit que le puits voisin venait de s'arrêter, obstrué par le sable ; lorsque celui-ci fut débouché, le premier retrouva son ancien écoulement.

La profondeur des puits artésiens de la ville de Tours varie de 120 à 170 mètres.

Puits de la Butte-aux-Cailles et de la place Hébert, à Paris. — La ville de Paris, après le succès obtenu par le forage de Passy, décida la construction de deux nouveaux puits, l'un vers le Panthéon, l'autre vers la place du Trône.

Comme ils devaient plonger dans la même nappe que le puits de Passy, on chercha à éloigner le plus possible les trois forages et on les plaça aux sommets d'un triangle équilatéral. L'un des nouveaux puits se trouve à la Chapelle, place Hébert, et l'autre à la Butte-aux-Cailles, près de la barrière Fontainebleau. On

s'est décidé depuis à les pousser jusqu'au terrain jurassique, afin de ne point affaiblir les puits de Passy et de Grenelle.

Ce qui caractérise les nouveaux puits, c'est l'adoption des grands diamètres, dont nous avons dit plus haut les avantages.

Sans revenir ici sur les procédés de forage décrits à l'Exécution des travaux, nous nous contenterons de représenter le grand trépan de 0m,70 de diamètre dont s'est servi M. Saint-Just Dru :

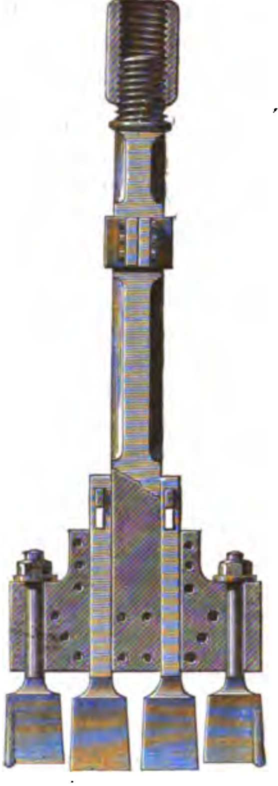


Fig. 29.

Il comprend quatre lames indépendantes, solidement ajustées sur la base de la sonde et faciles à monter comme à démonter : Cet outil, en retombant, agit par percussion sur la roche et la broye ; à chaque coup, le trépan tourne d'un certain angle afin de creuser un trou cylindrique. Les détritus sont enlevés de temps en temps avec une cuiller cylindrique à soupape.

A la Butte-aux-Cailles, on a descendu un grand puits ordinaire à la profondeur de 80 mètres environ, et M. Dru a commencé le forage au diamètre de 1m,20.

A la place Hébert, le puits ordinaire n'a pu atteindre que 34m,40, et le sondage fut entrepris alors par MM. Degousée et Ch. Laurent au diamètre de 1m,50.

On descendit dans le sondage une première colonne de 1m,58 de diamètre intérieur et de 1m,63 de diamètre extérieur, puis une autre de 1m,39 de diamètre intérieur et de 1m,44 de diamètre extérieur. Le trépan de MM. Degousée et Laurent est circulaire et pèse 4,800 kilogrammes. Sa forme circulaire assure la régularité du trou, sa position toujours verticale en cas d'accident et, dès lors, quelque facilité pour le retrait, sa tête ne pouvant jamais aller se loger dans les parois. Il attaque le fond en plein au moyen d'une lame transversale qui réunit deux des branches. Dans le cas où on voudrait découper un échantillon du terrain en colonne, il suffit de supprimer la lame transversale et de lui substituer deux des lames ordinaires.

Puits de Rochefort. — MM. Degousée et Laurent ont été chargés en 1861, par le ministre de la marine, de l'exécution d'un forage à l'hôpital de la marine de Rochefort.

On comptait trouver une nappe jaillissante à 200 mètres ; il n'en fut rien, et, sans se décourager, on poussa toujours plus avant jusqu'à 857m,78.

A la cote 816m,30, on avait rencontré une nappe jaillissante donnant au niveau du sol 150 litres d'eau par minute à la température de 42°.

Les terrains traversés sont :

1° Le terrain crétacé inférieur,
2° Les terrains oolithique et jurassique de 49m,33 à 765m,54
3° Le terrain triasique de. . . . . 765m,54 à 852m,33
4° Un calcaire bitumineux de.. . . . . . 852m,33 à 854m,48
5° Un grès très-dur de. . . . . 854m,48 à 857m,78.

Trois colonnes de tubes en tôle ont été descendues pour maintenir les terrains éboulants et séparer le courant ascendant des couches perméables qui, malheureusement, ont paru à l'origine absorber une grande partie du débit :

La 1re colonne de	310	millimètres de	diamètre intérieur	va du sol à	49m,33
La 2e —	260	—	—	va jusqu'à	188m,66
La 3e —	210	—	—	—	759m,26.

La partie inférieure a été terminée sans tubage de garantie.

» Il a fallu cinq années d'un travail constant pour atteindre l'eau jaillissante à la profondeur de 816m,30.

L'eau jaillissante du puits de Rochefort a un débit de 2 litres à la seconde ; sa température est de 40 à 44 degrés ; elle contient en dissolution des sulfates et des chlorures qui lui donnent une grande analogie avec les eaux minérales et thermales de Wiesbaden.

Le plus grand inconvénient à surmonter est l'infiltration du courant ascendant à travers les assises perméables des terrains supérieurs. Pour écarter cet inconvénient, les constructeurs ont proposé d'introduire dans le sondage une nouvelle colonne d'ascension, construite de manière à empêcher les eaux de remonter par l'espace annulaire resté libre entre le premier tubage et les parois du forage.

État actuel des travaux de sondage. — Les derniers documents que nous possédions sur les travaux de sondage datent de l'Exposition de 1867.

« Cette exposition, dit M. Ch. Laurent-Degousée, prouve que l'art des sondages ne cesse pas de progresser. Il n'est plus limité comme autrefois à l'emploi des petits diamètres et paraît, au contraire, tout disposé à ne reculer devant aucune des nécessités que peuvent lui imposer les autres branches industrielles. L'instrument, si simple et si modeste il y a seulement vingt-cinq ans, a pris des dimensions qui vont jusqu'à dépasser 4 mètres de diamètre. Rien ne fait supposer que la sonde s'arrête là. Grâce aux progrès de la métallurgie et des arts mécaniques, qui viennent mettre à la disposition du sondeur les éléments qui lui faisaient autrefois défaut, cet art a pu augmenter ses moyens d'action et renoncer à ces dimensions restreintes qui limitaient ses travaux et ses recherches. Aujourd'hui, pour des sondages très-ordinaires, l'instrument de sondage ne descend guère au-dessous de 0m,16, n'admettant pas moins de 0m,10 pour la pose des colonnes d'ascension, lorsqu'il s'agit de recherches d'eau pour les besoins particuliers.

« Les chiffres inférieurs résultent de circonstances fâcheuses et imprévues, et dénotent plus souvent l'indigence des moyens employés qu'une volonté admise en principe d'arriver à d'aussi faibles limites. Un sondeur expérimenté s'arrangera toujours de manière à maintenir des dimensions qui lui offriront des ressources suffisantes pour donner à ses outils le poids et la force convenables. C'est ainsi qu'il assure la certitude du résultat à obtenir et la facilité de réparer promptement les accidents. Ces précautions constituent à elles seules une des causes principales des succès constants obtenus par les bons sondeurs. On aurait quelque peine à trouver aujourd'hui un sondage abandonné soit par suite d'accidents réputés autrefois irréparables, soit par suite de dimensions trop réduites pour atteindre la profondeur indiquée. »

CHAPITRE IV

DISTRIBUTIONS D'EAU PAR DÉRIVATION

On trouve la description des principales distributions d'eau dans des monographies détaillées, que nous ne saurions reproduire ici et qui ne sont intéressantes à consulter que pour le spécialiste. Nous nous contenterons d'indiquer les dispositions générales de quelques distributions d'eau choisies parmi les plus connues.

1° EAUX DE ROME [1]

« Si l'on considère, dit Pline, la quantité incroyable d'eaux qu'on avait fait venir à Rome pour l'usage du public, pour les fontaines, les bains, les viviers, les maisons particulières, les jardins, les maisons de campagne; si l'on se représente des arcades construites à grands frais et conduites pendant un très-long espace de chemin, des montagnes coupées, des roches percées, des vallées profondes comblées, on avouera qu'il ne s'est rien vu de plus merveilleux dans tout l'univers. »

Voici les dates et la longueur des principales dérivations :

1° En l'an 442 de Rome, dérivation de la source Appia. — Longueur 26,000 mètres, presque tout entière en souterrains; 40 mètres seulement étaient en arcades;

2° En l'an 484, dérivation du fleuve Anio, affluent du Tibre. La longueur de cet aqueduc de l'Anio-Vieux était de 63,800 mètres, dont 330 mètres seulement en superstructure;

3° En l'an 608 de Rome, construction par le préteur Marcius de l'aqueduc qui porte le nom d'eau Marcia et qui amène au Capitole des eaux de sources très-pures, prises sur la rive droite de l'Anio, à une distance de 91,600 mètres; l'aqueduc se trouvait en substruction sur 750 mètres et en arcades sur 10,500 mètres aux environs de Rome;

[1] M. Rozat de Mandres, inspecteur général des ponts et chaussées, a donné une description des eaux de Rome, à la fin du premier siècle de notre ère. C'est à cette description que nous empruntons nos renseignements, qui sont extraits du reste d'un mémoire de Sextus Julius Frontinus, surintendant des eaux de Rome, *Mémoire* traduit en 1820 par Rondelet.

4° En l'an 627 de Rome, on dérive les sources de la Tépula et de la Julia; la longueur de l'aqueduc est de 23,000 mètres, dont plus de 9,000 mètres en arcades. L'aqueduc de la Tépula est superposé aux arcades de l'aqueduc Marcia, et l'eau de la Julia coule sur le même aqueduc au-dessus de l'eau de la Tépula;

5° En 732, on construit l'aqueduc de l'eau vierge, eau de source excellente maintenue à sa naissance dans une enceinte de maçonnerie de briques et ciment. La longueur de l'aqueduc est de 23,000 mètres, dont environ 1,050 mètres en arcades;

6° Vers la même époque, on dérive les eaux du lac Alsietinus, eaux peu salubres, destinées à la naumachie d'Auguste et à l'usage des jardins. Longueur de cette dérivation, 33,000 mètres.

7° Auguste renforça l'eau Appia par un ruisseau dérivé en souterrain sur 4 kilomètres, et l'eau Marcia par une source de la rive droite de l'Anio, dérivée au moyen d'un aqueduc de 500 mètres de long; cette source portait le nom d'eau Augusta;

8° Caligula, et Claude après lui, amenèrent à Rome, pour les besoins d'un luxe sans cesse croissant, l'eau Claudia et une seconde dérivation de l'Anio. Cette dérivation, faite sur le cours supérieur, amène l'eau sur toutes les collines au moyen d'aqueducs dont les arcades atteignent 33 mètres de hauteur, et qui a près de 69 kilomètres de long. Les eaux, souvent troubles, s'épuraient dans des piscines disposées sur le cours de l'aqueduc.

Les aqueducs romains étaient en maçonnerie; leur section, d'abord rectangulaire, fut ensuite profilée en plein cintre.

L'ouverture des voûtes, des arcades, variait de 5 à 8 mètres.

L'aqueduc Claudia avait, aux abords de Rome, dans la partie en arcades, une pente de $0^m,0015$ par mètre, et depuis l'origine des arcades jusqu'à la source une pente de $0^m,0023$.

La pente de l'aqueduc de l'eau Marcia était aussi d'environ $0^m,002$.

Les anciens aqueducs possédaient uue pente plus forte; Vitruve parle de $0^m,005$.

L'approvisionuement total de la Rome Impériale s'élevait à 1,500,000 mètres cubes d'eau par jour, pour un nombre d'habitants qu'on peut évaluer à un million. C'est 1,500 litres par jour et par tête; nous sommes encore bien loin de cette profusion!

Eaux de Rome moderne. — Rome n'était plus alimentée vers 1860 que par trois aqueducs: l'eau Vergine, l'eau Felice et l'eau Paola.

L'eau Vergine (ancienne eau Vierge) et l'eau Felice proviennent de sources; l'eau Paola est alimentée à la fois par des sources et par le lac Bracciano.

Le volume total, versé chaque jour dans Rome, est de 180,000 mètres cubes; c'est encore une proportion considérable par tête d'habitant, puisque la population de Rome n'était, en 1858, que de 170,000 habitants.

L'eau Vergine est la seule potable; l'eau Felice est chargée de calcaire, et l'eau Paola de limon et de substances organiques,

2° DISTRIBUTION D'EAU D'AVALLON

La distribution d'eau d'Avallon a été projetée et exécutée en 1847 par M. l'ingénieur Belgrand, aujourd'hui directeur des eaux de Paris, qui, depuis, a réalisé les dérivations colossales de la Dhuis et de la Vanne.

M. Belgrand a rendu compte de son travail dans une notice insérée aux annales des ponts et chaussées de 1850, notice à laquelle nous emprunterons les renseignements suivants.

Les figures 1 et 2 de la planche 2 donnent le plan et le profil en long de la distribution qui se compose :

« 1° D'une conduite libre en béton de ciment de Vassy, de 3629 mètres de longueur établie entre les sources de l'étang Minard, dans la vallée d'Aillon, et la pointe du contrefort des Alleux qui domine le Cousin en face de la ville ;

2° De vingt et un regards établis sur cette conduite ;

3° D'un réservoir de forme cylindrique ayant 16 mètres de diamètre intérieur, 2 mètres de profondeur, recouvert d'une voûte en calotte sphérique de 2m,14 de flèche, formée de trois rangs de briques simples posées à plat, à bain de mortier de ciment ;

4° D'une conduite forcée de 1270 mètres de longueur, en tuyaux de fonte de 0m,162 de diamètre intérieur, destinée à franchir le ravin de 88 mètres de profondeur, au fond duquel roule le Cousin, et à établir une communication entre le réservoir et la ville ;

5° D'un pont aqueduc sur le Cousin, d'une seule arche de 30 mètres d'ouverture et de 3 mètres de flèche, construite en maçonnerie brute avec mortier de ciment de Vassy. »

La conduite libre, partant de A, suit le lit de l'ancien ruisseau pour recueillir une multitude de petites sources jusqu'en B; en C elle en recueille de nouvelles.

Entre A et C, sur 357 mètres, la pente de la conduite suit celle de la prairie, 1 à 8 millimètres par mètre.

De C en F jusqu'au réservoir des Alleux, sur 3272 mètres, la conduite se développe à flanc de coteau sur les terrains granitiques avec une pente uniforme de 1 centimètre pour 30 mètres, ou d'un tiers de millimètre par mètre.

Sauf aux points D et E, où l'on a dû exécuter l'aqueduc dans des tranchées de quelques mètres de profondeur, afin d'éviter un long détour, cet aqueduc se trouve dans une fouille descendant à 1m,50 au dessous du sol.

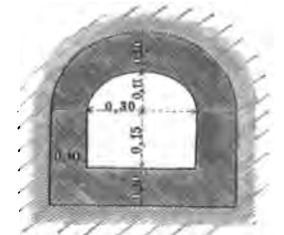


Fig. 30.

Le profil de l'aqueduc est celui de la figure 30 : cuvette de 0m,30 sur 0m,15 recouverte d'une anse de panier de 0m,30 sur 0m,11 ; épaisseur uniforme de la maçonnerie, 0m,10. Il en résulte un cube de 0m,136 par mètre courant, porté à 0m,1375 afin de donner aux pieds droits un léger fruit destiné à faciliter le moulage.

Cet aqueduc a coûté 7 francs le mètre courant; une galerie voûtée, capable de livrer passage à un homme, ce qui est une condition nécessaire pour les répara-

tions, eût coûté 38 francs le mètre. Avec l'aqueduc en ciment, lorsqu'une avarie locale survient, on enlève le tronçon détérioré et on le remplace par une pièce moulée toute neuve.

Le tableau suivant donne le débit de l'aqueduc pour des hauteurs d'eau de 5,10 et 15 centimètres; ce débit a été calculé par la formule de M. Bazin $RI=Au^2$, dans laquelle on a donné à A les valeurs qui conviennent aux parois unies :

HAUT. D'EAU DANS LA CUVETTE	SECTION D'ÉCOULEMENT	PÉRIMÈTRE MOUILLÉ	RAYON MOYEN	COEFFICIENT A	VITESSE MOYENNE u	DÉBIT A LA SECONDE (litres)	DÉBIT PAR 24 HEUR. (mètres)
mètre	mq.	mètre			mètre		mc.
0,05	0,015	0,4	0,0375	0,000549	0,15	2,25	194
0,10	0,030	0,5	0,06	0,000412	0,223	6,69	578
0,15	0,044	0,6	0,075	0,000358	0,265	11,925	1,030

Les regards, espacés de 150 mètres, sont des cylindres verticaux de $0^m,80$ de diamètre, recouverts d'une dalle qui fait saillie de $0^m,05$ sur le sol ; à l'aplomb du regard, le fond de l'aqueduc est établi à $0^m,10$ en contrebas des parties voisines ; c'est dans la cavité ainsi formée que s'amassent les sables et les terres qui sont entraînés par le courant et qu'on enlève de temps en temps.

Le réservoir cylindrique des Alleux a une capacité de 400 mètres cubes ; l'épaisseur du radier est de $0^m,50$ et celle des murs d'enceinte est de 2 mètres, avec seize contre-forts de $1^m,50$ de large et de 1 mètre d'épaisseur. La voûte en trois rangs de briques à plat a une épaisseur de $0^m,14$ avec sa chape de $0^m,03$; elle est recouverte d'une couche de terre de $0^m,50$ et porte ainsi 900 à 1000 kilogrammes par mètre carré.

Les murs et le radier du réservoir sont recouverts d'une chape en mortier de ciment de $0^m,03$ d'épaisseur.

La conduite forcée part du fond du réservoir; lorsque celui-ci est plein jusqu'à son déversoir, la charge sur le point le plus bas de la conduite est $88^m,80$, et la charge disponible entre le réservoir et le point où la conduite débouche, pavé de la tour d'Horloge, est de $7^m,00$ pour une longueur de tuyau de 1270 mètres.

Calculons le débit de cette conduite forcée, en nous servant de la formule de Darcy.

$$Ri = b_1 u^2;$$

Le rayon R est égal à. . . . . $0^m,081$

La perte de chaque i par mètre courant est égale à . . $\frac{7}{1270}$.

le coefficient b_1 est égal à 0,00586 pour les tuyaux neufs et à deux fois ce nombre pour des tuyaux en service depuis quelque temps.

Ces nombres nous donnent ;

$$u^2 = 0,38 \quad u = 0,616$$

et, comme la section est de $0^{mq},0206$, le débit de la conduite atteint le chiffre de $12^{lit},69$ à la seconde.

On voit donc que la conduite forcée débitera facilement le volume qu'amène au réservoir l'aqueduc coulant à pleine cuvette.

Les tuyaux sont en fonte, à cordon et emboîtement ; leur épaisseur a été proportionnée à la charge maxima qu'ils devront supporter, et calculée par la formule connue.

L'aqueduc est, avons-nous dit, en béton de ciment de Vassy; on moule séparément la cuvette et la voûte qui la recouvre; les morceaux de la cuvette avaient $0^m,50$ de long et ceux de la voûte $0^m,25$.

Chaque mètre cube de béton a employé, pour le moulage seulement :

1j,16 de maçon,
2j,56 de gâcheur,
0j,25 de manœuvre,
392 kilogrammes de ciment de Vassy.
$0^{mc},445$ de sable.
$0^{mc},645$ de pierrailles.

Il va sans dire que les morceaux successifs étaient soudés entre eux au moyen d'un bon mortier de ciment.

Pour le captage des sources, la cuvette de l'aqueduc a été posée à morceaux jointifs comme dans le travail courant ; mais on a laissé entre les morceaux successifs de la petite voûte des joints libres de $0^m,10$, par où les eaux tombent dans la cuvette qui ne les abandonne plus. La conduite est entourée d'une pierrée recouverte de mousse, afin que les eaux seules puissent passer sans entraîner les terres et les détritus.

La dépense totale s'est élevée à 97598 fr. 18 c.
qui se décompose comme il suit :

Conduite libre de 3630 mètres de longueur.	33,223f,96
Réservoir.	11,463f,42
Pont aqueduc.	9,189f,28
Conduite forcée de 1270 mètres.	35,601f,11
Dépenses en régie pour épuisements et terrassements dans l'eau	6,835f,41
Frais de surveillance.	1,000f,00
Total égal.	97,598f,18

Il faut bien remarquer que dans cette dépense n'entrent pas les frais de distribution dans la ville même.

3° DISTRIBUTION D'EAU DE DIJON.

La distribution d'eau de Dijon a été établie par Darcy, inspecteur général des ponts et chaussées, qui en a consigné les détails dans une œuvre fort intéressante et très-remarquable, à laquelle nous avons pu faire de larges emprunts, car elle ne sera pas rééditée.

Historique des eaux de Dijon. — D'après Grégoire de Tours, Dijon était, vers la fin du sixième siècle, une place forte au sud de laquelle coulait la rivière d'Ouche, tandis que, du nord descendait la rivière de Suzon, dont les eaux parcouraient les fossés des remparts.

Du septième siècle au dix-septième siècle, les eaux de diverses fontaines de Dijon furent amenées dans la ville, entre autres les sources de la Ribottée et des Lochères qui, conduites dans un aqueduc en bois de 596 toises, étaient reçues dans une auge en pierre surmontée d'un lion en pierre (1445).

En 1534, furent détruites les fontaines de Champ-Damas et de la tour Saint-Nicolas, créées 89 ans auparavant.

Dans la même année 1534, on amena sur la place de Saint-Michel la fontaine de Champ-Maillot ; mais, en 1556, la conduite ne fonctionnait déjà plus. Elle fut rétablie, puis supprimée en 1636, à cause de l'infection que dégageaient les eaux croupissantes du bassin Saint-Michel.

En 1619, un fontainier s'engagea à conduire sur la place de la Sainte-Chapelle, moyennant une somme de 2700 livres, une source située près de Montmusard ; la fontaine de la Sainte-Chapelle fut détruite 20 ans après, en 1640.

Les eaux de ces fontaines étaient peu abondantes et variaient de 15 à 30 litre par minute.

Le cours de Suzon, qui arrosait les remparts de la ville, n'a jamais été bien régulier et a éprouvé fréquemment des diminutions énormes ; en 1418, le conseil de ville délibère : « Qu'on fasse rompre une grosse pierre étant au cours de Suzon, afin que, par ce moyen, l'eau du dit Suzon vienne plus souvent à Dijon qu'elle ne faict. » Des règlements fréquents interdirent de jeter dans le cours de Suzon tous gravats et immondices.

En 1561, sur une ordonnance du vicomte Maïeur et des échevins, le cours de Suzon fut visité pour y rechercher les sources que l'on pourrait y amener ; les experts remarquèrent surtout, près de Messigny, une belle et grosse fontaine, appelée fontaine du Rosay ou du Rosoir, dont ils dirent : « et sont les sources d'icelle, la plupart bouchées de sable, argile, et encombrées de limons de terre qui empêchent fort la dite fontaine de jeter et effluer son eau. »

De ce moment germa l'idée de conduire à Dijon le produit de la fontaine du Rosoir, mais on voulait toujours emprunter le lit de Suzon, lit perméable où l'eau se perdait bien vite ; il eût fallu établir une cuvette maçonnée, et l'on reculait devant la dépense de construction et d'entretien.

Bien des projets furent présentés ; le plus sérieux est celui d'un sieur Chapus, qui vers 1670 proposa d'amener les eaux de la fontaine du Rosoir en les enfermant dans un aqueduc maçonné.

Au dix-neuvième siècle, Dijon se trouvait toujours dans une déplorable situation au point de vue des eaux potables ; les habitants avaient exclusivement recours à des puits particuliers et à une centaine de puits placés sur les voies publiques ; ces derniers n'étaient même pas couverts et il n'était pas rare que le seau qui ramenait l'eau destinée aux usages domestiques renfermât un animal noyé depuis plusieurs jours.

Darcy se posa le problème d'amener à Dijon 150 litres d'eau par habitant et par jour, soit 4500 mètres cubes en tout par vingt-quatre heures.

Il montra d'abord que, si l'on prenait cette eau dans la rivière d'Ouche et qu'on l'élevât par machines, il faudrait dépenser 100,000 francs comme capital de construction, et au moins 30,000 francs par an en frais d'exploitation. Par ce procédé, on obtiendrait des eaux impotables en temps de crue, d'un goût marécageux en temps de sécheresse, et d'une température tellement élevée en été qu'on ne pourrait les boire sans les faire rafraîchir.

Il fallait donc écarter les machines élévatoires et recourir à la dérivation de

la source du Rosoir, dérivation qui ne coûtait que 360,000 francs et donnait une eau toujours pure et limpide.

Source du Rosoir, température de l'eau des conduites. — La source du Rosoir sort, à flanc de côteau, du calcaire à entroques compris entre la terre à foulon et les marnes du Lias; la terre à foulon est surmontée de la grande oolithe.

La source de Jouvence, voisine de celle du Rosoir, sort de la terre à foulon.

La température moyenne de la source du Rosoir est de 10°,37 ; par une journée de juin 1849 excessivement chaude, la température était de 10°,6.

On a cherché ce que devenait cette température dans le réservoir et aux différentes voies d'écoulement, et on a trouvé les résultats suivants :

ANNÉE 1847	23 JUIN	10 JUILLET	24 JUILLET	10 AOUT	30 NOVEMB.	18 DÉCEMB.	24 JANVIER 1848
Température moyenne de l'air. .	16°	21°	21°	17°	5°	1°7	—3°
Température moyenne du réservoir de la porte Guillaume.	11°	11°5	12°	12°	11°	10°8	9°4
Température moyenne des bornes-fontaines.	12°3	12°7	13°2	13°5	10°6	9°9	8°6

Constance de température dans les distributions d'eaux de source. — Les résultats expérimentaux montrent que la température des eaux distribuées est sensiblement constante. On a donc des eaux fraîches en été et chaudes en hiver.

C'est un immense avantage en faveur des distributions d'eaux de sources ; jamais on n'obtiendra rien de pareil avec les eaux de rivière élevées par machines.

Depuis 1856, M. Belgrand poursuit sur la température des eaux de Paris des expériences régulières, il a trouvé que :

« 1° Les eaux de rivière, distribuées à Paris, se refroidissent un peu en été et se réchauffent un peu en hiver, dans le parcours des conduites. La plus grande variation constatée, correspondant à une température extraordinaire de 28°, a été de 3°,60.

« 2° Les plus grandes variations de l'eau de la Dhuis, qui parcourt un aqueduc de 130 kilomètres, sont de 2° en été et de 1° en hiver. »

L'argument de la constance de la température est donc capital en faveur des distributions d'eaux de sources.

Ce point était important à établir, parce qu'on l'a quelquefois méconnu lorsqu'on a opposé les distributions par machines élévatoires aux distributions par dérivation.

Analyse et débit de la source du Rosoir. — L'eau de la source du Rosoir est très-salubre ainsi que le montre l'analyse suivante faite sur 10 litres d'eau :

Silice.	152	millig.
Alumine.	10	—
Carbonate de magnésie. . . .	21	—
Carbonate de Chaux.	2300	—
Chlorure de magnésium. . .	19	—
A reporter. .	2502	—
Report. . .	2502	—
Chlorure de sodium.	7	—
Sulfate de soude.	27	—
Carbonate de soude.	44	—
Nitrate de potasse.	27	—
Total. . .	2607	—

C'est donc $0^{gr},26$ de résidu solide par litre d'eau.

Le débit de la source du Rosoir, constaté par déversoirs, est donné par le tableau suivant :

En 1832,	débit minimum	le 30 septembre. .	2770 litres à la minute.	
En 1833	—	5 —	3107	—
En 1842	—	9 —	3975	—
En 1843	—	11 —	3926	—
En 1845	—	3 octobre.. . .	4635	—
En 1846	—	29 septembre. .	3769	—

Ainsi, le débit minimum a toujours lieu vers l'automne, c'est-à-dire à la fin de la saison chaude ; c'est ce qui se produit pour toutes les sources, ainsi que nous l'avons déjà dit.

Le débit diminue dans les périodes sèches et augmente dans les périodes humides.

En 1832, on était entré depuis quelques années dans une période humide, qui a duré jusqu'en 1856 ; aussi voit-on le débit de la source du Rosoir monter de 2,700 litres à 4,600 litres.

Il est probable que, depuis 1856, ce débit a diminué dans de notables proportions. Il reprendra sa valeur ancienne après une succession d'hivers humides.

L'augmentation de 2,700 à 4,600 litres dans le débit de la source du Rosoir, constatée de 1832 à 1845, tient aussi à ce que l'orifice d'épanchement de la source a été dégagé et abaissé de $1^{m},10$.

Augmentation du débit par l'abaissement de l'orifice de la source. — L'abaissement de l'orifice d'une source produit le même effet que le raccourcissement du tube d'un puits artésien : la charge disponible augmente et, avec elle, le débit.

Ce résultat est facile à vérifier par une expérience directe faite le même jour sur la même source.

Tracé et profil en long de l'aqueduc du Rosoir. — Le profil en long de l'aqueduc du Rosoir est donné tout entier sur la planche 3.

La longueur de l'aqueduc est de $12694^{m},80$; la fontaine du Rosoir est sur la rive droite de Suzon, qui est très-escarpée, aussi l'aqueduc passe-t-il immédiatement sur la rive gauche au moyen d'un petit tunnel établi sous le cours de Suzon. Il passe ensuite trois fois de la rive gauche à la rive droite et inversement, et débouche enfin dans le réservoir de la porte Guillaume, après avoir parcouru une longue série d'arcades.

Le développement total comprend :

43 alignements droits.	$12,216^{m},302$
42 courbes..	$478^{m},498$
Total. . . .	$12,694^{m},800$

Tous les rayons des circonférences de raccordement sont de 20 mètres.

Les pentes successives, ainsi que les chutes aux extrémités des pentes, sont inscrites sur le profil en long, et il paraît inutile de les reproduire ici.

L'abaissement total produit par les pentes est de.. .	$46^{m},758$
— — les chutes..	$6^{m},550$
D'où résulte une chute totale de. .	$53^{m},308$

Profils en travers de l'aqueduc. — Les profils en travers de l'aqueduc du Rosoir sont représentés par la planche 4.

Le type courant, figure 4, a une largeur de $0^m,60$ et une hauteur sous clef de $0^m,90$; il est terminé en plein cintre et recouvert d'un enduit de $0^m,03$.

Il règne sur $11,682^m,25$.

Sur les ponts aqueducs on a adopté une section rectangulaire; au passage de diverses routes, on a réduit la hauteur à $0^m,75$. Au passage sous le lit du Suzon, on a, au contraire, augmenté la hauteur afin de permettre la visite facile de l'aqueduc.

Les figures 5, 6, 7, représentent plusieurs de ces profils exceptionnels.

« J'avais d'abord, dit Darcy, pensé que, pour raison d'économie, on pouvait se borner à adopter une section présentant une largeur moyenne de $0^m,47$ sur la hauteur de $0^m,50$. Cette section aurait été suffisante pour le débit du volume nécessaire à l'alimentation de la ville de Dijon ; mais, dans une conduite de cette étendue, il est nécessaire de se ménager des moyens faciles de vérification ; or, la section précitée n'aurait pas permis à un homme de s'introduire dans l'aqueduc. Cette observation a été approuvée par le conseil municipal de Dijon, qui n'a pas craint de voter le supplément de dépense nécessaire à l'obtention d'une section plus considérable.

L'épaisseur des maçonneries a du reste été calculée de manière à obtenir un cube aussi faible que possible, sans nuire à la solidité.

L'épaisseur du radier, $0^m,30$, a été augmentée sur une petite longueur à l'aval des grandes chutes verticales qui suivent les ponts aqueducs.

L'enduit en ciment ne règne que sur le radier et les piédroits jusqu'à la hauteur maxima que l'eau doit atteindre ; ainsi, la hauteur de l'enduit a été de $0^m,30$ pour toutes les pentes au-dessus d'un millimètre, $0^m,50$ ou de toute la hauteur des parois verticales du conduit rectangulaire qui précède les trois viaducs de Suzon, $0^m,40$ dans la partie de l'aqueduc où la pente n'est que de $0^m,00086$. Cet enduit était arrondi aux angles suivant un congé de $0^m,04$; il avait pour effet de réduire à $0^m,54$ la largeur de la cuvette.

Bâtiment recouvrant la source. — Avant de construire l'enceinte en maçonnerie qui environne la source, on a déblayé son bassin de $1^m,50$ à 2 mètres, de manière à mettre à nu les rochers qui le bordent et à apprécier aussi exactement que possible les points d'où surgissent les eaux.

On arrive aisément à cette dernière connaissance en répandant de la fleur de son à la surface de la nappe fluide. En effet, si elle est repoussée dans tous les sens, suivant des cercles concentriques, on conclut que le point de jaillissement correspond au centre de ces cercles, lequel reprend le premier sa transparence. Si, au contraire, la poussière suit une direction rectiligne, on peut également en conclure la direction du courant horizontal suivant lequel sont amenées les eaux, (fig. 3 à 6, pl. 5).

Après s'être ainsi assuré des points précis d'où jaillissaient les sources, on a fait tracer les fondations de telle sorte que les maçonneries ne puissent altérer le débit.

La voûte qui recouvre les sources a dans œuvre la largeur de $5^m,20$ et la longueur de $11^m,10$; elle se termine du côté de la montagne par une niche de $2^m,60$ de rayon.

Prises d'eau supplémentaires. — Planche 4, figures 8, 9, 10. On a établi en trois points des prises d'eau supplémentaires, destinées à recueillir des sources secondaires.

L'aqueduc porte latéralement deux chambres de $0^m,30$ de profondeur sur $0^m,50$ de large, séparées de la cuvette de l'aqueduc par une dalle verticale de $0^m,40$ de hauteur, c'est-à-dire d'une hauteur supérieure à celle de la tranche d'eau qui coule dans l'aqueduc. Les deux chambres communiquent avec le derrière des culées de l'aqueduc par un orifice rectangulaire aplati de $0^m,20$ sur $0^m,10$; l'extrémité de cet orifice est entourée d'une pierrée, que traversent les eaux de source, qui gagnent ainsi les chambres où elles s'élèvent et d'où elles tombent dans l'aqueduc en passant sur la dalle verticale qui forme déversoir.

Une rainure verticale ménagée dans les parois de la chambre permet d'interrompre la communication entre l'aqueduc et la source, et de ne pas admettre les eaux de celle-ci lorsqu'elles deviennent accidentellement impropres à l'alimentation.

On remarquera que les eaux de la source sont forcées de surmonter la dalle verticale qui sépare la chambre et l'aqueduc; elles perdent donc de leur charge et par suite de leur débit. On pourrait éviter cet inconvénient au moyen de siphons plongeant d'un côté dans la chambre, de l'autre côté dans l'aqueduc, siphons qui fonctionneraient d'une manière intermittente.

Regards de service. — Les figures 1 à 3 de la planche 4 représentent les regards de service placés d'abord à toutes les chutes et puis dans des positions intermédiaires de telle sorte que leur distance moyenne fût de 100 mètres au plus.

Plusieurs de ces regards sont couverts d'un pavillon : cette disposition est évidemment la plus commode; mais elle impose une assez forte dépense, et, en général, les regards sont fermés par une dalle recouverte de terre comme le reste de l'aqueduc.

Des bornes méplates, terminées par un demi-cylindre à la partie supérieure, indiquent les regards sur les chutes. Ces bornes servent en même temps à déterminer d'une manière précise le tracé de l'aqueduc.

En établissant des chutes de place en place, Darcy n'a pas eu l'intention de diminuer la pente, comme on pourrait le croire au premier abord ; il n'a pas attaché d'importance à la régularité de la pente de l'aqueduc qui varie, comme nous l'avons vu, dans des limites assez étendues. Son but a été, en réservant ces chutes qui atteignent $0^m,50$ à 1 mètre : 1° de baisser assez le radier pour que son extrados restât toujours à 1 mètre au-dessous du sol dans les points où le relief change brusquement ; 2° de disposer, à des intervalles assez rapprochés, des moyens de placer d'une manière commode des appareils de jauge qui ne fussent pas noyés par l'eau d'aval.

Malgré la faible épaisseur des parois de l'aqueduc, on n'a jamais reconnu de différence entre les jaugeages exécutés à son origine et à son extrémité.

Ponts aqueducs sur le Suzon. — Trois ponts aqueducs ont été établis sur le Suzon : ils sont à trois arches de $3^m,25$ avec deux piles de $1^m,10$ à la base, et de $0^m,90$ au sommet.

Chaque arche est franchie au moyen d'une auge en pierre de $0^m,60$ de hauteur et de $0^m,85$ de largeur à l'extérieur, livrant à l'intérieur un passage de $0^m,40$ sur $0^m,45$; les auges successives se terminent et se soudent à l'aplomb des piles ; elles sont recouvertes par des dalles de longueur irrégulière, de $0^m,20$ d'épaisseur, faisant saillie latéralement de $0^m,05$.

Pont aqueduc près la porte Guillaume. — Figures 1, 2, 2 *bis*, planche 5. Entre les deux pavillons de ses extrémités, cet aqueduc a une longueur de

148 mètres; il comprend 59 arcades en plein cintre de 2 mètres de diamètre, cinquante-huit piles de 0m,50 d'épaisseur et 2 culées de 1 mètre.

L'épaisseur à la clef des voûtes est de 0m,30. Sur la plinthe de 0m,20 reposent les deux murs latéraux de la cuvette et le radier est au niveau de la plinthe ; les deux murs latéraux sont surmontés d'une dalle, taillée à deux égouts, formant la toiture de l'aqueduc.

Le viaduc a été complétement exécuté en moellon smillé et les enduits n'ont été appliqués qu'après l'achèvement et le recouvrement de la cuvette.

Dépenses de l'aqueduc. — Les dépenses de l'aqueduc du Rosoir se sont élevées à 256,916 fr. 26 cent., savoir :

Terrassements.	46,824f,81
Maçonnerie.	162,320f,56
Chape.	14,113f,93
Enduits.	19,399f,07
Béton.	2,961f,45
Regards.	1,811f,30
Bornes.	952f,53
Cintrements.	3,005f,54
Ouvrages accessoires.	5,527f,07
Total égal. . . .	256,916f,26

Le prix de revient par mètre courant d'aqueduc s'est élevé à 20 fr. 87 cent.
Il faut ajouter au total précédent :

Les ouvrages exécutés pour la prise d'eau et le tunnel sous le lit du Suzon.	12,266f,41
Les trois ponts aqueducs.	13,135f,20
L'aqueduc de la porte Guillaume.	26,264f,15
Les sept pavillons recouvrant les regards	8,400f,00
Total.	60,065f,76
Montant général des travaux.	316,982f,02

soit, en nombre rond, 25 francs par mètre courant de la dérivation.

Distribution intérieure. — Les travaux de distribution intérieure comprennent :

1° Deux réservoirs, placés l'un en tête, l'autre à l'extrémité de la conduite ou artère principale ;

2° Un système de tuyaux en fonte de différents diamètres qui, se ramifiant dans tous les quartiers de la ville et des faubourgs, viennent alimenter les bornes-fontaines.

Quelques-unes de ces conduites sont placées dans des galeries en maçonnerie ; d'autres sont simplement placées dans des tranchées remblayées après leur pose. Les unes et les autres sont interrompues par des cuves de distribution sur lesquelles viennent se brancher plusieurs conduites, par des robinets destinés à intercepter, lorsqu'il y a lieu, l'écoulement des eaux ou à vider les conduites. Sur quelques unes d'entre elles, enfin, il y a eu nécessité de fixer des ventouses pour donner issue à l'air, dont la présence altérait le débit des tuyaux.

Ce système de tuyaux est susceptible d'une classification méthodique.

On distingue, en premier lieu, l'artère principale en communication directe avec les réservoirs, et qui peut être considérée comme leur prolongement. Sur

cette artère viennent se brancher, à droite et à gauche, une série de tuyaux, appelés répartiteurs parce que leur fonction est de porter, dans les différents quartiers d'une ville, les eaux renfermées dans l'artère principale et transmises par les réservoirs. Enfin, ces tuyaux répartiteurs qui, de même que la conduite principale, peuvent alimenter directement un certain nombre de bornes-fontaines placées dans les rues qu'ils parcourent, envoient leurs eaux dans les rues perpendiculaires à leur direction, au moyen de branchements secondaires, desquels partent les tuyaux de service proprement dits, c'est-à-dire ceux dont l'extrémité aboutit aux fontaines, bornes-fontaines ou qui desservent les concessions particulières.

Réservoir de la porte Guillaume. — Planche 6. C'est un réservoir circulaire de 28m,10 de diamètre dans œuvre à la naissance des voûtes : un puits, d'un diamètre intérieur de 2m,50, en occupe le centre ; le mur d'enceinte de ce puits, qui supporte un édicule extérieur très-élégant, a 2 mètres d'épaisseur. L'intervalle de 10m,80 entre la paroi extérieure dudit puits et la paroi intérieure du réservoir, est recouvert par deux voûtes annulaires reposant sur un piédroit dont l'épaisseur est de 0m,80 à la naissance de ces voûtes ; le diamètre de ces voûtes en plein cintre est donc de 5 mètres.

Le mur d'enceinte du réservoir a une épaisseur de 3 mètres à sa base, et le mur circulaire de refend ou piédroit des deux voûtes aunulaires, a une épaisseur de 1m,20 à sa base.

L'épaisseur des voûtes à la clef est de 0m,40.

La hauteur totale du réservoir est de 5 mètres.

Le radier a des pentes qui convergent vers le puits central dont le plafond est en contrebas de 0m,20, afin de permettre l'assèchement complet du réservoir.

Le trop plein du réservoir est conduit par un tuyau spécial dans le Jardin botanique de la ville.

Toutes les maçonneries du réservoir ont été faites en moellon brut à l'exception des voûtes, du mur de refend intermédiaire et du parement intérieur du puits central, lesquels ont été exécutés en moellon smillé.

L'épaisseur du radier, variable suivant la nature du terrain rencontré, est d'au moins 0m,50.

Toutes les parois intérieures sont recouvertes d'un enduit en chaux hydraulique de 0m,04 d'épaisseur et la chape sur les voûtes a 0m,10 d'épaisseur.

Le puits central du réservoir renferme tous les tuyaux et robinets de distribution qui permettent :

1° D'interrompre toute communication entre l'aqueduc, le réservoir et la conduite principale ;

2° D'interrompre toute communication entre l'aqueduc et le réservoir, tout en laissant l'aqueduc en communication avec la conduite principale ;

3° D'interrompre la communication de l'aqueduc et du réservoir en laissant celui-ci en communication avec l'artère principale ;

4° D'alimenter la ville à la fois avec le réservoir et la conduite.

La capacité du réservoir est de 2313 mètres cubes.

On a eu soin de ménager, au sommet de la voûte annulaire à l'extérieur, une issue pour l'air confiné qui, sans cela, s'y comprimerait et rendrait inutile une partie de la capacité.

Réservoir de Montmusard. — Le réservoir de Montmusard se trouve à l'extrémité de la conduite principale, fig. 2, planche 6.

La nécessité du réservoir de la porte Guillaume est évidente : il est destiné à

parer aux inconvénients des chômages que peuvent entraîner les réparations de l'aqueduc et de ses accessoires. A raison de 20 litres par habitant, le réservoir pourrait suffire pendant 4 ou 5 jours à l'alimentation de 27000 habitants.

Ce réservoir est destiné, en outre, à emmagasiner pendant la nuit le produit de la source, ce qui permet de doubler le volume d'eau employé pendant le jour; c'est, pendant l'été, chose nécessaire, afin de satisfaire aux besoins du service de l'arrosage.

L'établissement d'un second réservoir à Montmusard n'était pas moins nécessaire; d'abord, il emmagasine un certain volume d'eau et permet de prolonger la mise en chômage de l'aqueduc, si cette mesure est indispensable. Mais, son principal avantage est d'alimenter à lui seul la ville, lorsque des réparations forcent à fermer la première partie de la conduite principale; grâce aux communications établies entre tous les répartiteurs, le réservoir de Montmusard peut envoyer son eau, à peu près, à toutes les bornes-fontaines de Dijon.

Ce système remplace celui qui consiste à adopter pour l'artère principale une conduite fermée, c'est-à-dire partant du réservoir et y revenant de manière à être alimentée des deux côtés : les réparations dans une section n'entraînent que le chômage de cette section unique.

Enfin, comme nous l'avons vu dans la partie théorique, l'alimentation par deux réservoirs permet d'augmenter le débit de l'artère principale aux divers points de son parcours; les réservoirs emmagasinent pendant la nuit toute l'eau qu'ils rendent pendant le jour.

Le réservoir de Montmusard représente dans œuvre un carré de 29 mètres de côté, partagé en cinq parties égales par cinq voûtes en plein cintre de 5 mètres de diamètre, que séparent quatre piédroits de 1 mètre d'épaisseur.

La capacité de ce réservoir est de 3,177 mètres cubes.

Artère principale. — La première partie de l'artère principale, entre le réservoir de la porte Guillaume jusqu'à la rue Lamonnoye, a $0^m,35$ de diamètre et 967 mètres de longueur.

A la rue Lamonnoye, la conduite se bifurque en deux branches : la première, branchée rectangulairement sur la conduite de $0^m,35$ de diamètre, descend dans la rue Lamonnoye, retourne dans la rue Jehannin avec courbe de 40 mètres de rayon, et suit cette rue jusqu'à la cuve de distribution n° 1, la longueur de cette partie est de 444 mètres et son diamètre $0^m,162$, elle porte un robinet vanne à sa naissance et à son extrémité. La seconde branche se raccorde par un tuyau conique avec la conduite de $0^m,35$, elle dessert trois rues et vient déboucher aussi dans la cuve de distribution n° 1, après un parcours de $324^m,20$ avec un diamètre de $0^m,135$, elle est aussi munie de robinets vannes à ses deux extrémités.

De la cuve de distribution n° 1, part la conduite qui se prolonge jusqu'au réservoir de Montmusard; sa longueur est de $811^m,70$ et son diamètre $0^m,216$.

En tous les points hauts de ces conduites, on a placé des ventouses et des robinets de décharge à tous les points bas.

Cette artère principale alimente les répartiteurs et dessert directement treize bornes-fontaines au moyen de six ramifications secondaires peu importantes.

Comme on le voit sur le profil en long, on n'a pas hésité, pour la facilité des réparations et la surveillance de l'étanchéité de la conduite, à la placer en galerie sur une grande partie de sa longueur.

Les profils en travers des galeries sont représentés par les figures 4 et 5, planche 6.

Répartiteurs. — Les répartiteurs sont branchés sur l'artère principale : cinq sur le côté droit et cinq sur le côté gauche.

Leur diamètre, proportionné aux besoins qu'ils ont à desservir, est de 0m,135, 0m,162, 0m,19 (ce dernier alimente la gerbe d'eau de la place Saint-Pierre), 0m,108.

Dépense de la distribution intérieure. — La distribution d'eau de la ville de Dijon a entraîné une dépense totale de 1,250,000 francs, savoir :

Travaux extérieurs, aqueduc du Rosoir		357,967f,27
Réservoir de la porte Guillaume	53,520f,12	345,492,30
— de Montmusard	49,128f,70	
Galeries souterraines	227,652f,13	
Regards, rigoles de décharge, puits perdus	»	
Conduites posées en galerie		133,267f,79
— en tranchées		117,809f,19
Conduite en plomb de 0m,034 de diamètre		7,079f,40
Robinetterie		40,237f,52
141 bornes-fontaines		41,817f,60
Édicule sur le réservoir de la porte Guillaume		38,549f,12
Tour-udomètre sur le réservoir de Montmusard		4,877f,35
Bassin du jet d'eau de la porte Saint-Pierre		10,000f,00
Presse hydraulique pour éprouver les tuyaux		1,480f,20
Approvisionnements, dépenses diverses		58,787f,18
Assainissement de l'égout de Suzon		69,026f,61
Total		1,222,391f,63
Ou en nombre rond		1,250,000f,00

4° DISTRIBUTION D'EAU DE MARSEILLE

Par une loi du 4 juillet 1838, la ville de Marseille a été autorisée à dériver de la Durance un volume d'eau de 5mc,75 par seconde, lors de l'étiage de cette rivière.

Pendant la plus grande partie de l'année, lorsque le niveau de la Durance est à 0m,50 au-dessus de l'étiage, le volume précédent se trouve à peu près doublé.

Le canal principal de dérivation a son origne à 187m,25 au-dessus du niveau de la mer, sur la rive gauche de la Durance, près du pont de Porthuis.

Sa longueur est de 81,753m,87, jusqu'au point où le canal se bifurque en entrant sur le territoire de Marseille et alimente deux branches, dirigées l'une à l'est et l'autre à l'ouest.

Le canal a une pente de 0m,30 par kilomètre; avec une hauteur d'eau de 1m,50 il débite le volume de 5m,75 par seconde, avec une vitesse de 0m,84.

Dans les souterrains, la pente a été portée à 1 mètre par kilomètre, afin de conserver le débit en réduisant la section.

Le canal principal a les dimensions suivantes :

Largeur à la cuvette	3m,00
Largeur à l'étiage (1m,50 au-dessus du fond)	7m,00
Largeur au sommet	9m,40
Profondeur totale du canal	2m,40

La ligne principale comporte 46 tunnels d'une longueur de 16,914 mètres, et 11 grands ponts dont le principal est le pont-aqueduc de Roquefavour.

Les travaux de construction du canal ont coûté 16,799,551 fr. 08 et les embranchements sur le territoire de Marseille, 3,073,378 fr. 94.

Cette œuvre énorme est due à M. l'ingénieur de Montricher. La ville de Marseille est donc abondamment pourvue d'eau; malheureusement, l'eau de la Durance est fréquemment trouble, et les bassins de filtration sont quelquefois impuissants à la clarifier d'une manière complète.

Aqueduc de Roquefavour. — Il est impossible de ne pas donner ici la description du superbe aqueduc de Roquefavour, que représentent les figures 2 et 4 de la planche 7, extraite du *Traité d'architecture* de M. Reynaud[1] :

La longueur de cet aqueduc est de 393 mètres et sa hauteur maxima audessus de la base des socles 82m,65 ; sa largeur au sommet est de 4m,50. Il comprend trois étages de voûte :

Le 1er étage a une hauteur de	34m,10	avec	12	arches de	15	mètres d'ouverture,
Le 2e	—	37m,60	—	15	—	16	—
Le 3e	—	10m,95	—	53	—	5	—

Les piles sont armées de contre-forts, dont elles excèdent la largeur de 2 mètres dans l'étiage inférieur; ces contre-forts règnent jusque sous la plinthe qui couronne le second étage.

Sans entrer dans les détails de construction des voûtes, détails qui appartiennent plutôt à un autre ouvrage, nous nous attacherons surtout à la cuvette.

Cette cuvette, maçonnée en briques, a 2 mètres de largeur au plafond, 2m,30 en gueule et 2m,40 de hauteur, avec une pente de 0m.006 par mètre.

L'aqueduc de Roquefavour a coûté 3,700,000 fr.; il est d'un effet grandiose et d'une architecture élégante. Mais, il est probable qu'on ne l'établirait pas aujourd'hui, ou que tout au moins on le remplacerait par un aqueduc moins élevé, supportant plusieurs conduites forcées en fonte ou en tôle.

On arriverait de la sorte à une solution plus économique.

Débit de cet aqueduc. — Le débit est facile à calculer par la formule de Bazin,

$$ri = b_1 u^2$$

dans laquelle on prend pour b_1 la valeur qui convient aux parois unies.

Si la section était complétement pleine, l'aqueduc arriverait à débiter 20 à 25 mètres cubes à la seconde.

Si la hauteur d'eau dans la cuvette n'est que de 1m,50, la vitesse est de 4 mètres par seconde et la surface d'écoulement de 3m,15, ce qui fait un débit de 12m,60.

[1] Nous devons à l'obligeance de M. Léonce Reynaud, directeur des phares, ancien professeur d'architecture à l'école polytechnique, la magnifique planche qui contient à la fois l'aqueduc de Roquefavour et le pont du Gard. Cette planche est extraite de son *Traité d'architecture*, guide précieux dans toutes les parties de l'art de l'ingénieur. — (2 vol. et 2 atlas de 179 planches.)

5° DISTRIBUTION D'EAU DE SAINT-ÉTIENNE.

La distribution d'eau de Saint-Étienne présente quelques analogies avec celle d'Avallon précédemment décrite. M. l'ingénieur de Montgolfier en a donné tous les détails dans une notice insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées* de 1875. Cette notice traite en même temps la question du barrage du Furens, travail qui avait pour but la régularisation du cours de cette rivière et la préservation de la ville de Saint-Étienne contre les inondations.

Le barrage du Furens sera étudié dans une autre section de notre *Traité*, en même temps que les grands barrages en maçonnerie.

A mesure que l'agglomération de Saint-Étienne s'est accrue, les eaux du Furens se corrompirent et devinrent insuffisantes.

On songea d'abord à amener dans la ville les eaux de la Loire, dérivées par un canal ou élevées par machines ; on agit sagement en renonçant à ce projet qui était coûteux dans l'un comme dans l'autre cas, et qui ne fournissait que des eaux fréquemment troubles.

Un projet consistant à recueillir et à dériver les sources de la vallée haute du Furens fut présenté par MM. Graëff et Conte-Grandchamps, et accueilli par la municipalité.

Le produit de ces sources pouvant devenir insuffisant en été, le réservoir régulateur du Gouffre-d'Enfer, plus connu sous le nom de Barrage du Furens, fut chargé de parfaire le volume d'eau nécessaire à l'alimentation et à la salubrité de la ville.

Le travail exécuté se compose d'une série de canaux recueillant les sources pour les jeter dans un aqueduc principal, qui les amène dans un réservoir de distribution dominant la ville entière.

Aqueduc principal. — L'aqueduc principal reçoit, dans la partie haute de la vallée du Furens, les sources de vingt-deux ruisseaux qui prennent naissance dans les forêts de sapins dont sont recouverts les plateaux du mont Pilat ; à son passage près du réservoir du Gouffre-d'Enfer, il peut être mis en communication avec l'aqueduc de vidange de ce réservoir et lui emprunter un certain volume complémentaire.

L'aqueduc principal, de 17,385^{m},75 de long, présente une série de biefs à pente décroissante de 0,01 à 0,005 et 0,003, réunis au moyen de plans, inclinés de 0^{m},12 à 0^{m},30 par mètre ; ces plans inclinés créent des chutes de 6 à 33 mètres de hauteur, que l'on peut utiliser pour l'établissement d'usines.

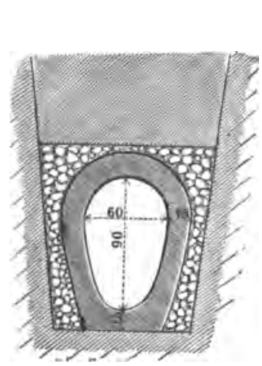
Les figures ci-jointes représentent les profils en travers des diverses sections de l'aqueduc principal :

Le premier est à piédroits verticaux supportant une voûte en anse de panier ; sa hauteur libre est de 0^{m},52 sous clef ; sa largeur est de 0^{m},35 près du radier et 0^{m},36 aux naissances, disposition qui a pour but de faciliter le moulage ; ce type règne sur 5,061^{m},50 à l'origine de l'aqueduc de dérivation ;

Le second type, appliqué sur 2,187^{m},15, est ovoïde, avec une section libre de 0^{m},90 de hauteur, de 0^{m},60 de large aux naissances, et de 0^{m},355 au niveau du radier ;

Le troisième type, appliqué sur 4,395^{m},69, est ovoïde, avec une section libre de 1^{m},15 de hauteur, de 0^{m},70 de large aux naissances, et de 0^{m},483 au niveau du radier.

Pour ces trois types, exécutés en maçonnerie de ciment de Vassy, les épaisseurs respectives des parois sont de 0^{m},09, 0^{m},15 et 0^{m},18, et l'intérieur de la section



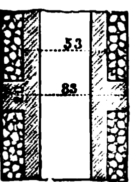


Fig. 131.

jusqu'au niveau des naissances est garni d'un enduit de mortier de ciment de Vassy de 0^{m},015 d'épaisseur pour le premier type et de 0^{m},03 pour les deux derniers.

Le type n° 3 a été amplifié encore sur 7,742^{m},41, dans la section qui aboutit au réservoir d'alimentation; sa hauteur a été portée à 1^{m},52, avec une largeur de 0^{m},80 au niveau des naissances, et de 0^{m},50 au niveau du radier.

L'aqueduc est partout établi en déblai et recouvert d'une couche de terre d'au moins 1^{m},20.

Sur les plans inclinés dont nous avons parlé, le profil est légèrement modifié en ce sens que le radier est construit sous forme d'escalier dont les marches ont 0^{m},50 de foulée et 0^{m},15 à 0^{m},20 de hauteur; grâce à cette disposition, les eaux, malgré leur grande vitesse, n'ont pu attaquer les enduits.

Tous les 5 à 6 mètres, dans les courbes, tous les 10 à 15 mètres dans les alignements droits, les aqueducs sont renforcés à l'extérieur par des contre-forts de 0^{m},20, qui relient les piédroits avec les parois des fouilles; le reste du vide est rempli en pierres sèches.

Partout où l'on avait à craindre quelque pression d'eau tendant à renverser l'aqueduc, on a établi par dessous des aqueducs de décharge ou des pierrées.

Regards. — Tous les 200 mètres on a placé des regards de service de 0^{m},80 de côté, dont les maçonneries ont 0^{m},20 d'épaisseur; ces regards correspondent à des puisards de 0^{m},20 de profondeur, où les sables s'accumulent et d'où on les enlève facilement.

A l'amont et à l'aval des chutes, on trouve des regards qui correspondent à des puisards de 1^{m},20 de profondeur, destinés à permettre l'installation des conduites en fonte qui dévieraient l'eau latéralement pour faire mouvoir des turbines, dans le cas où on voudrait utiliser ces chutes; le puisard d'aval a en outre pour objet d'amortir la vitesse de l'eau.

On a encore établi des regards aux points où les conduites de captage des sources viennent se souder à l'aqueduc principal. — Ces regards sont à deux compartiments, comme ceux établis par Darcy sur l'aqueduc du Rosoir pour les fontaines de Dijon : les deux compartiments sont séparés par une dalle verticale,

sur laquelle se déversent les eaux de la source qui ont déposé leur sable dans le premier compartiment. Le second compartiment communique avec l'aqueduc principal par un orifice que peut fermer un clapet métallique garni de cuir, battant sur une plaque de bronze, et manœuvré par une tige à crémaillère.

Déversoirs. — Sur quatre points de l'aqueduc, on a établi, au niveau des naissances, des déversoirs latéraux qui empêchent l'eau d'atteindre une hauteur dangereuse et de transformer l'aqueduc en conduite forcée.

Près du déversoir sont disposées deux vannes métalliques : l'une, vanne d'arrêt, capable d'intercepter la section de l'aqueduc jusqu'au niveau des naissances; l'autre, vanne de décharge, placée dans un puisard en contre-bas, permet de vider complétement une section d'aqueduc et de la visiter, si c'est nécessaire.

Construction des divers types de l'aqueduc. — La construction du premier type de l'aqueduc s'opérait comme il suit :

La maçonnerie de ce premier type est faite avec mortier de ciment de Vassy, composé de 1 volume de ciment et 1 volume de sable granitique fin et lavé. — Une première brigade d'ouvriers confectionne le radier et l'établit suivant la pente voulue, indiquée par des piquets. — Une seconde brigade établit les piédroits, en se servant d'un gabarit formé de deux planches de 3 mètres de long, s'appliquant l'une sur un piédroit, l'autre sur le piédroit opposé ; les deux planches sont maintenues à l'écartement voulu par des crochets en fer et des tasseaux de calage : lorsque la maçonnerie était achevée, on n'avait qu'à enlever les tasseaux et à dégager les crochets pour replier les deux planches et les porter plus loin. — Une troisième brigade établissait les solins du radier et appliquait l'enduit. — Une quatrième brigade préparait, dans le voisinage, au moyen de moules en tôle avec charnières, des morceaux de la petite voûte destinée à recouvrir l'aqueduc; on introduisait à la partie supérieure des moules un mélange de 2 volumes de mortier pour 1 volume de pierre cassée. — Au bout de huit à dix minutes, le mélange avait fait prise, on dégageait les crochets et on faisait tourner autour des charnières le châssis supérieur du moule; on laissait sécher la pièce pendant deux ou trois jours, à l'abri du soleil, puis on venait l'appliquer sur les piédroits en interposant une couche de mortier de ciment de $0^{m},02$; on faisait par la compression refluer le ciment, et il n'y avait plus qu'à enlever les bavures à la truelle. — Quand un châssis avait servi, on le nettoyait et on le lavait avant de procéder à une nouvelle opération.

Les types n° 2, n° 3 et n° 4 étaient construits tout entiers sur place par des procédés analogues, avec un mortier composé de 1 volume de ciment pour 2 volumes de sable. — La voûte était établie au moyen de cintres présentant une charnière à la clef, de manière qu'une moitié de cintre pouvait se rabattre sur l'autre : un grand crochet, placé suivant le diamètre des naissances, maintenait l'écartement des deux moitiés du cintre ; mais, lorsqu'on dégageait ce crochet, les deux moitiés du cintre se repliaient et pouvaient être reportées plus loin pour servir à la confection d'une nouvelle longueur de voûte.

Le pont aqueduc du Pas-du-Riot a été construit de même en maçonnerie de moellons et de mortier de ciment de Vassy ; une fissure s'étant produite après le décintrement, a été entaillée en biseau sur $0^{m},05$ de profondeur et $0^{m},10$ de largeur, puis remplie de goudron végétal mêlé d'un peu de bitume, et recouverte d'un enduit de ciment de $0^{m},03$ d'épaisseur. La fuite n'a plus reparu.

Prix de revient. — Les prix de revient sont très-intéressants à connaître, car le mode de production des aqueducs précédents est susceptible d'applications nombreuses.

PRIX D'UN MÈTRE CUBE DE MORTIER DE CIMENT.		PRIX DU MÈTRE CUBE DE MAÇONNERIE EN MATÉRIAUX DE PETITE DIMENSION AVEC LE MORTIER PRÉCÉDENT,			
		POUR LE TYPE N° 1.		POUR LES TYPES N° 2 À 4.	
	francs.		francs.		francs.
700 kilogrammes de ciment à 9 francs. .	63,00	0^m,50 de mortier à 70^f,40.	35,20	0^m,40 de mortier à 1 de ciment pour 2 de sable à 52^f,20.	20,88
0^m,80 de sable à 3 francs.	2,40	0^m,80 de petits matériaux à 2^f,50.	2,00	1^m,10 de moellons à 2^f,25.	2,47
Façon du mortier.	5,00	Façon, enduits, moulage, pose.	15,00	Façon de la maçonnerie.	5,00
Total. . . .	70,40	Outils, faux frais, soudure.	2,35	Enduits et chape en mortier de 1 de ciment pour 1 de sable.	3,00
		Total.	54,55	Cintres, outils, faux frais.	1,57
		Bénéfice 1/10. . .	5,45	Total. . . .	32,92
		Total.	60,00	Bénéfice. . .	3,29
				Total. . . .	36,21

Le prix du mètre courant du type n° 1 est ressorti à 11^f,20 y compris 0^f,46 pour garnissage en pierres sèches.
— — 2 — 23^f,57 — 0^f,90 —
— — 3 — 30^f,12 — 1^f,20 —

L'aqueduc principal, y compris les terrassements et tous les accessoires, est revenu à 62 francs le mètre courant.

Captage des sources. — Le principe, dit M. de Montgolfier, qui a présidé au captage des sources, est le suivant :

« Dans chaque affluent, capter les sources autant que possible à leur point d'émergence, les introduire dans des conduites fermées d'où elles ne puissent plus s'échapper, les diriger ainsi, suivant la déclivité du terrain, dans des collecteurs établis au bas de la vallée et, de là, dans l'aqueduc principal. »

1° Lorsqu'on avait découvert une source, se manifestant à la surface par un suintement, on exécutait une fouille jusqu'au rocher et on la fermait à l'aval par un barrage en maçonnerie de ciment de $0^m,15$ d'épaisseur et de $0^m,40$ de hauteur, dans lequel on encastrait, soit un drain en poterie, soit une conduite en béton de ciment, destinée à emmener le produit de la source. A l'amont du barrage, le drain encastré se prolongeait par un drain en poterie à manchons à joints ouverts qu'on recouvrait d'une pierrée pour faciliter l'introduction de l'eau. Le fond et les parois de la fouille à l'emplacement de la source sur une longueur d'environ 1 mètre, étaient revêtus d'une maçonnerie de ciment de $0^m,10$ d'épaisseur, formant cuvette étanche à l'amont du barrage. La fouille était remplie de pierres qu'on revêtait d'un corroi argileux de $0^m,10$ d'épaisseur, arrosé d'un lait de chaux ; le remblai s'achevait avec de la terre ordinaire.

2° Les conduites tertiaires des sources sont amenées dans des conduites secondaires, qui, elles-mêmes, recueillent les suintements des tranchées qui les contiennent. Ces suintements sont arrêtés par des barrages, analogues à celui que nous venons de décrire plus haut, établis à l'aval des parties aquifères.

3° Des collecteurs reçoivent dans chaque vallée le produit des conduites tertiaires et secondaires; ces collecteurs sont aussi munis de barrages, partout où se montrent des suintements; ils suivent la pente de la vallée, en se tenant toutefois à une certaine distance du thalweg, pour éviter les eaux d'inondation.

Toutes ces conduites sont souterraines.

Des regards rectangulaires de $0^m,60$ de largeur, sont placés à l'aval des sources importantes et à la jonction de plusieurs conduites. Le tuyau d'aval est $0^m,10$ au-dessous du tuyau d'amont et, à $0^m,10$ au-dessus de ce dernier, le regard est muni d'un déversoir, de sorte que la charge sur le tuyau d'aval ne dépasse pas $0^m,20$.

Les conduites de captage ont un développement total de 53 kilomètres et s'étendent sur une surface de 220 hectares, appartenant à la ville de Saint Étienne.

Elles sont en tuyaux de poterie ou en pièces moulées avec du mortier de ciment :

1° les tuyaux de drainage de $0,^m05$ à $0^m,06$ de diamètre, réunis par des manchons lutés avec du ciment, sont revenus à 1 franc le mètre; on en assemble plusieurs ensemble avant la pose, afin de ne poser à la fois que des longueurs de 1 mètre à $1^m,20$;

2° Les conduites en mortier de ciment sont analogues à celle que représente la figure 32 ; les morceaux sont préparés dans des moules, comme nous l'avons expliqué, et assemblés dans la fouille, en interposant dans les joints une couche de $0^m,02$ de ciment, puis enlevant les bavures.

La conduite de $0^m,15$ d'ouverture est revenue à 3 francs 80 le mètre courant,

et la conduite à section carrée de 0m,12 d'ouverture est revenue à 3 francs 10.

Le débit de l'ensemble des sources ainsi captées varie de 60 à 450 litres par seconde. Pour donner à la ville 150 litres par habitant, il faut 13,000 mètres cubes par 24 heures ; aussi, doit-on emprunter au réservoir du Furens jusqu'à 8,000 mètres cubes par jour dans les grandes sécheresses.

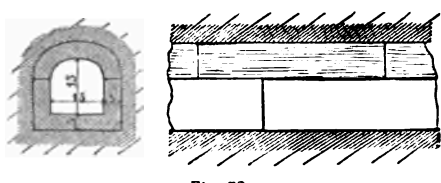


Fig. 32.

L'eau distribuée est d'excellente qualité, et, malgré son long voyage, sa température ne dépasse pas 10° à 11°. C'est donc une eau très-fraîche en été.

Distribution intérieure. — L'eau de l'aqueduc est amenée dans le bassin du Rey à la côte 618m,75 ; ce bassin a une capacité de 7,000 mètres cubes.

La ville de Saint-Étienne présente, entre ses divers quartiers, des différences d'altitudes considérables ; ainsi, la place Royale n'est qu'à 517 mètres, tandis que les quartiers hauts vont jusqu'à 595 mètres.

M. de Montgolfier eut l'idée de desservir toute la ville par deux réseaux : le réseau supérieur et le réseau inférieur.

Le réseau supérieur a deux artères, qui partent d'une conduite principale de 0m,50 de diamètre, partant elle-même du bassin du Rey : l'artère Est s'élève au Jardin des plantes à la côte 591 et y alimente un bassin de 1,100 mètres cubes ; elle redescend sur la place Fourneyron et s'élève ensuite jusqu'au point culminant du quartier du grand Cimetière à la côte 570 ; cette artère a un diamètre de 0m,216.

L'artère Ouest a d'abord un diamètre de 0m,30, elle alimente le bassin de Sainte-Barbe de 1,100 mètres cubes, prend ensuite un diamètre de 0m,216, puis se bifurque en deux conduites : l'une de 0m,135, l'autre de 0m,108 de diamètre, alimentant deux quartiers différents.

Une conduite supplémentaire de 0m,25 de diamètre, part du bassin du Rey et se rend au Jardin des plantes ; grâce à elle et aux deux réservoirs secondaires, on peut assurer le service dans le cas où la conduite de 0m,50 est en réparation.

Le reseau supérieur alimente les quartiers qui se trouvent au-dessus de la courbe de niveau 540 ; le réseau inférieur alimente la partie centrale de la ville.

Ce réseau se compose d'une conduite de 0m,30 de diamètre, qui met l'artère Ouest du réseau supérieur en communication avec le réservoir de Champagne, d'une capacité de 6,700 mètres ; du réservoir de Champagne part une conduite de 0m,30, qui traverse toute la ville en suivant la route Nationale, n° 82 ; comme toutes les rues de la ville coupent cette voie normalement, les embranchements ou répartiteurs sont d'un établissement bien facile.

Le réservoir de Champagne serait insuffisant à assurer l'alimentation de la partie basse ; aussi a-t-on établi, au moyen de quatre cuves, des communications entre le réseau supérieur et le réseau inférieur, et par ces cuves on se procure le volume supplémentaire qui peut être nécessaire.

La canalisation intérieure a coûté.	640,000 francs.
Les bassins ont coûté.	280,000 —
La distribution intérieure s'élève donc à. . .	920,000 —

Tous les travaux de la distribution, y compris la création du réservoir du Gouffre-d'Enfer, ont entraîné une dépense de 4,800,000 francs.

6° DISTRIBUTION D'EAU DE NEW-YORK.

Dans la relation si intéressante de son voyage en Amérique, M. Malézieux, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a donné des renseignements sur les distributions d'eau des principales villes des Etats-Unis; ce sont ces renseignements que nous allons résumer.

La ville de New-York est établie au fond de la baie de l'Hudson, sur la rive gauche de la rivière d'Hudson, dans une île formée par cette rivière, par son affluent la rivière de l'Est et par la rivière de Harlem, faux bras de l'Hudson qui réunit ce fleuve avec la rivière de l'Est.

A 64 kilomètres en amont de New-York, l'Hudson reçoit la rivière du Croton, dont le débit d'étiage est de 122,661 mètres cubes par 24 heures ou 1,420 litres à la seconde.

Le lit du Croton a été intercepté par un barrage, qui surélève de $12^{m},20$ le niveau de l'étiage; on emmagasine ainsi, dans un lac artificiel de 160 hectares, 2,271,500 mètres cubes d'eau, et cette réserve compense l'insuffisance du débit d'été.

Cette réserve elle-même a été insuffisante dans ces dernières années et on a créé de nouveaux barrages dans les parties hautes de la vallée du Croton.

En amont du premier barrage du Croton, la superficie du bassin est de 875 kilomètres carrés, et la hauteur moyenne annuelle de pluie est de $1^{m},12$. Le sol étant peu perméable, on a évalué à 36 pour 100 les pertes par infiltration et évaporation à la surface du sol et à 19 pour 100 les pertes par évaporation dans le réservoir; on peut donc recueillir 45 pour 100, soit environ la moitié de la pluie tombée.

C'est presque un million de mètres cubes, dont on pourra dans l'avenir disposer tous les jours.

L'aqueduc de dérivation part du barrage du Croton, suit la vallée de cette rivière pendant 9 kilomètres, puis se développe sur la rive gauche de l'Hudson. Il franchit en siphon ou en pont siphon plusieurs vallées d'importance variable; les principales sont la vallée de Harlem, franchie par un pont siphon et la vallée profonde de Manhattan, que traverse un siphon simple.

Les eaux de l'aqueduc se déversent dans les réservoirs de réception, situés dans le parc central sur la colline d'York.

Les réservoirs de réception sont réunis par des conduites en fonte aux réservoirs de distribution, situés à $3^{k},5$ de là sur la colline de Murray, près de la cinquième avenue.

Le développement total de la dérivation est de 65,269 mètres.

L'aqueduc est maçonné dans toute la partie en amont du réservoir de récep-

tion, sauf dans les parties en conduite forcée où l'on a adopté des tuyaux en fonte ou en tôle.

La pente de l'aqueduc en amont de la rivière de Harlem est de $0^{m},21$ par kilomètre et de $0^{m},14$ en aval. Le tracé présente des déblais et des remblais considérables; il existe sur le parcours seize tunnels et vingt-cinq passages de cours d'eau.

La section intérieure de l'aqueduc est un plein cintre de $1^{m},13$ de rayon, établi sur des piédroits inclinés que relie à la base un radier concave de $2^{m},04$ de corde et $0^{m},23$ de flèche. La maçonnerie de l'aqueduc, pour le profil de tunnel en terre meuble, a une épaisseur de $0^{m},305$ formée par trois rangs de briques.

Lorsque la construction est en remblai, elle repose sur un massif de pierres sèches et le tout est englobé de terre; malgré les précautions prises pour l'exécution du massif, il y a eu des tassements et des ruptures de maçonnerie; un bon remblai en terre franche et sable, bien pilonné, eut sans doute conduit à de meilleurs résultats.

« L'ingénieur, M. Jervis, tenait beaucoup, dit M. Malézieux, à soustraire les maçonneries de l'aqueduc, et principalement la cuvette, à l'influence de la gelée. Dans une note écrite en 1842, il exprimait l'opinion qu'il n'est guère possible de faire des maçonneries susceptibles de rester toujours étanches ; l'humidité tout au moins finit par les pénétrer et par atteindre les parements extérieurs ; viennent alors les gelées intenses du climat de New-York, et l'on peut être certain que les cuvettes maçonnées de ponts-aqueducs ou ponts-canaux n'auront qu'une existence limitée. Avec cette préoccupation on s'explique que cet habile ingénieur ait songé à enterrer même l'aqueduc en remblai. »

Le ravin de Sing-Sing, qui est à $19^{m},21$ en contrebas de la ligne de fond de l'aqueduc, est franchi par un pont-aqueduc : arche en maçonnerie de $26^{m},84$ d'ouverture et de $9^{m},96$ de flèche. Pour obtenir une cuvette bien étanche, on a appliqué sur la maçonnerie une chemise en fonte, recouverte elle-même d'un placage de briques et ciment. Les murs latéraux de la cuvette sont séparés des murs de tête du pont par une rainure vide de $0^{m},15$ de large; cette rainure recueille les filtrations et renferme un matelas d'air isolant.

La vallée de la rivière de Harlem a 440 mètres de largeur suivant la ligne de fond de l'aqueduc; elle est franchie par un pont-siphon. Comme on voulait réserver pour la navigation un passage d'une hauteur d'au moins 30 mètres, le pont se compose de 15 arches en plein cintre, dont 8 de $24^{m},40$ d'ouverture et 7 de $15^{m},25$. Le pont supporte deux conduites en fonte de $0^{m},90$ de diamètre, situées à $3^{m},66$ en contrebas de la ligne de fond de l'aqueduc.

On a prévu pour le siphon ainsi constitué une chute de $0^{m},61$ qui s'est à peu près réalisée.

En 1862, les deux conduites de $0^{m},90$ de diamètre devenant insuffisantes, on a posé au-dessus d'elles un tuyau en tôle de $2^{m},30$ de diamètre, et on a exhaussé les murs de tête du pont de manière à envelopper ce tuyau dans une galerie maçonnée.

Au niveau de la ligne de fond de l'aqueduc, la vallée de Manhattan a 1275 mètres de large et $31^{m},11$ de creux. Elle est franchie en siphon par quatre conduites en fonte : trois de $0^{m},91$ de diamètre et une de $1^{m},22$. La chute ménagée pour ces conduites forcées est de $0^{m},91$, elle a été bien suffisante.

Il y a deux réservoirs de réception, exécutés dans le parc central partie en déblai, partie en remblai : le déblai descend jusqu'à 11 mètres dans le sol, et la profondeur d'eau totale atteint à peu près cette valeur; les digues d'enceinte

sont en terre et corroi central avec talus perreyé à l'extérieur; les digues intérieures de partage sont simplement en terre : un des réservoirs a une superficie de 14 hectares et contient 616000 mètres cubes, l'autre a une superficie de 40 hectares et contient 3,624,000 mètres cubes.

Les réservoirs de réception communiquent avec le réservoir de distribution par six conduites de $1^m,22$ de diamètre; ce réservoir est à parois en maçonnerie, il est voûté et recouvert de terre; sa contenance est de 76,000 mètres cubes.

En ce qui touche la distribution intérieure, toutes les conduites sont simplement posées en terre et le diamètre des conduites en fonte atteint jusqu'à $1^m,52$; cette dimension n'a pu être dépassée avec la fonte.

Dans tout le parcours du lac de Croton aux conduites de la ville, la température de l'eau ne varie guère : elle reste celle du lac. Cette température peut donc descendre presque à zéro en hiver et monter à 25° en été.

« Quel avantage, dit M. Malézieux, d'avoir des eaux de sources comme celles de la Dhuis, dont la température à peu près constante n'est pas montée à plus de 13° à Paris dans les plus fortes chaleurs de 1865. »

Les réservoirs à ciel ouvert s'opposent au maintien d'une température constante. Aussi l'usage de la glace est-il universel à New-York.

En 1870, la quantité d'eau distribuée à New-York s'élevait par jour à 308,040 mètres cubes, pour 942,292 habitants; cela fait 227 litres par habitant.

7° DISTRIBUTION D'EAU DE WASHINGTON.

Washington et Georgetown, séparées par la petite rivière Rock-Creek, sont alimentées par une dérivation du Potomac.

L'aqueduc, de 21 kilomètres de longueur, a une section circulaire de $2^m,75$ de diamètre intérieur et de $3^m,36$ de diamètre extérieur (fig. 1, pl. 14.) Cette forme de section est celle qui, théoriquement, convient le mieux à un aqueduc puisqu'elle a le moindre périmètre pour un volume donné. La maçonnerie comprend 3 anneaux de briques et probablement est revêtue, au moins à l'intérieur, d'un enduit en ciment.

La pente kilométrique de l'aqueduc est de $0^m,143$.

Lorsque le barrage du Potomac sera complet, l'aqueduc donnera tout ce qu'il peut débiter soit 300000 mètres cubes en vingt-quatre heures; actuellement on n'utilise que 45000 mètres cubes, ce qui, pour 120583 habitants, fait 372 litres par tête.

Le barrage du Potomac est en pierres de taille avec parements peu inclinés; il est renforcé à l'amont par un remblai recouvert d'enrochements, et la dalle de couronnement est reliée par des crampons en fer à l'assise inférieure; grâce à ces précautions, l'ouvrage a bien résisté aux crues et aux débâcles.

C'est sur le trajet de l'aqueduc du Potomac qu'on trouve le pont de Cabin-John, grande arche en maçonnerie de $67^m,10$ d'ouverture et de $11^m,36$ de flèche.

C'est aussi sur cet aqueduc qu'on trouve les deux ponts de College-Branch et de Rock-Creek, composés d'arcs en fonte; ces arcs ne sont autres que des tuyaux convenablement courbés et assemblés comme des voussoirs; l'eau de la dérivation passe à l'intérieur; l'arc en fonte et la conduite ne font qu'un et constituent un aqueduc-pont. Sur le Rock-Creek, on a ainsi jeté deux conduites en arc de

cercle de 61 mètres d'ouverture, de $6^m,10$ de flèche et de $1^m,22$ de diamètre intérieur ; ces deux conduites supportent un tablier métallique soumis à une circulation considérable. Nous avons donné une description sommaire de ces ouvrages à la page 228 de notre *Traité des ponts métalliques.*

8° DISTRIBUTION D'EAU DE PARIS.

Historique [1]. — Nous ne saurions faire ici l'histoire complète des eaux de Paris et nous nous contenterons d'en présenter un résumé chronologique.

Lutèce, réduite à l'île de la Cité, puisait à la Seine les eaux qui lui étaient nécessaires.

L'empereur Julien fit construire pour les Thermes de la rive gauche un aqueduc venant d'Arcueil, aqueduc détruit au neuvième siècle par les Normands.

Au moyen âge, les moines de l'abbaye de Saint-Laurent, située au pied de la butte Montmartre, amenèrent les eaux du Pré-Saint-Gervais, qui viennent des hauteurs de Romainville et de Ménilmontant.

En 1244, il existait dans l'abbaye de Saint-Martin des Champs une fontaine alimentée par l'aqueduc des eaux de Belleville.

De 1180 à 1222, Philippe Auguste fit établir la fontaine des Halles et celle des Innocents, qui tiraient leurs eaux de la fontaine Saint-Lazare, alimentée elle-même par l'aqueduc du Pré-Saint-Gervais ; il construisit en outre la fontaine Maubuée, alimentée par l'aqueduc de Belleville.

En 1265, le couvent des Filles-Dieu fut autorisé à prendre le volume d'eau dont il avait besoin sur la conduite venant de la fontaine Saint-Lazare aux Halles.

En 1392, Charles VI révoque les concessions particulières qui mettaient en chômage les fontaines publiques.

En 1457, le prévôt des marchands et les échevins font réparer l'aqueduc de Belleville et la municipalité prend ainsi possession des conduites d'eau ; cette possession n'était pas solidement établie, car plus d'une fois le roi et les personnages importants de la ville détournèrent à leur profit les eaux des fontaines publiques.

Avant le règne de Louis XII, le nombre des fontaines publiques fut porté à 16, mais les deux sources d'alimentation étaient toujours les aqueducs de Belleville et du Pré-Saint-Gervais.

En 1529, François Ier sollicite du bureau de ville une concession particulière et fait ériger la fontaine de la Croix-du-Trahoir, alimentée par le réservoir des Halles ; le prévôt des marchands, Jehan Tronson, en récompense de ses services, reçoit en même temps la permission de dériver de cette fontaine un filet d'eau de la grosseur d'un pois.

En 1550, les concessions particulières ayant tari les fontaines publiques, des lettres patentes de Henri II ordonnèrent aux particuliers de présenter les titres de leurs concessions.

[1] L'histoire des eaux de Paris jusqu'au commencement de ce siècle, a été faite en détails dans l'ouvrage intitulé : *Mémoire sur le canal de l'Ourcq*, par Girard, inspecteur général des ponts et chaussées, créateur du dit canal, un des savants qui accompagnèrent Bonaparte en Égypte.

Cette formalité de la présentation des titres fut ordonnée à nouveau en 1587.

Un des premiers ordres donnés par Henri IV, à son entrée dans Paris, fut celui de réparer les fontaines publiques, et de leur restituer toutes les eaux qui en avaient été détournées.

C'est en 1598 que fut inauguré le système des concessions à prix d'argent en faveur de Martin Langlois, prévôt des marchands.

En 1606, construction dans l'île de la Cité de la fontaine du Palais, alimentée par les eaux du Pré-Saint-Gervais, qui passaient sous le pavé du pont au Change.

Par lettres patentes de 1608, Henri IV révoque formellement les concessions particulières, à l'exception de celles accordées aux princes du sang et à quelques communautés religieuses.

A la même époque, Henri IV et Sully firent ériger la pompe de la Samaritaine, qui élevait les eaux de la Seine dans un réservoir placé sur le pont Neuf, d'où elles se rendaient aux Tuileries et au Louvre, ce qui permit d'abandonner au public la fontaine de la Croix-du-Trahoir. La pompe de la Samaritaine fut l'œuvre d'un Flamand, nommé Jean Lintlaer.

A la mort d'Henri IV, les concessions particulières recommencèrent à envahir le domaine public.

On commençait à se préoccuper de la création de l'aqueduc d'Arcueil; Sully avait donné l'éveil à ce sujet, en ordonnant de rechercher les vestiges de l'aqueduc Romain. Ce qui accéléra la dérivation des eaux d'Arcueil, ce fut la création du Luxembourg, par Marie de Médicis.

Il fallait pourvoir d'eau le nouveau palais; en 1612, un particulier nommé Joseph Aubry, offrit d'amener les eaux des fontaines de Rungis, dans un réservoir établi entre les portes Saint-Jacques et Saint-Michel.

En 1615, la première pierre du grand regard des fontaines de Rungis est posée par le roi Louis XIII, en présence de toute la cour.

L'aqueduc d'Arcueil devait fournir 30 pouces d'eau, 18 pour le roi et 12 pour la ville qui en disposait à sa volonté.

En 1623, les eaux d'Arcueil arrivèrent au regard de la porte Saint-Jacques et furent réparties entre les ayants droit.

En 1624, le roi posa la première pierre de la fontaine de la Grève, alimentée par une conduite des eaux d'Arcueil.

Quatorze autres fontaines publiques se partagèrent ces eaux.

Néanmoins, la multiplicité des dérivations particulières, l'ignorance où l'on était des lois de l'écoulement, ne tardèrent pas à produire de nouvelles disettes d'eau et à susciter de nouvelles plaintes.

En 1651, un sieur Bocquet, bourgeois de Paris, exécuta de concert avec la ville des travaux de captage qui portèrent de trente à cinquante-quatre pouces le débit des eaux d'Arcueil.

En 1653, le surintendant Fouquet achète moyennant la somme de 10000 livres un pouce d'eau à prendre sur les sources de Belleville et du Pré-Saint-Gervais.

François Villette et Girard Desargues avaient en 1626 présenté le projet d'élever les eaux de la Seine; en 1656, ce projet fut repris par Mathurin de Mouchery qui proposait d'établir sa machine hydraulique à l'entrée des fossés de l'Arsenal.

En 1666, les concessions de toutes natures, et surtout les concessions honorifiques, s'étaient tellement développées, qu'il fallut les supprimer toutes sans exception.

En 1666, Regnault de la Fontaine propose d'établir, pour l'alimentation du

faubourg Saint-Germain, une machine hydraulique prenant les eaux de la Seine entre le Pré aux clercs et l'île des Cygnes (aujourd'hui terre-plein du pont Neuf); sa proposition n'est pas accueillie.

En 1669, Daniel Jolly proposa d'acquérir le moulin à blé situé sur la troisième arche du pont Notre-Dame, du côté du quai de Gesvres, et de substituer au mécanisme du moulin quatre corps de pompes aspirantes et foulantes, dont une nouvelle roue à aubes entretiendrait le jeu. — Ce projet fut accueilli; le fonctionnement des appareils de la Samaritaine en garantissait, du reste, le succès.

En 1670, Jacques Demance, gendre de Ricquet de Bonrepos, présenta le projet d'une seconde machine à huit corps de pompe qui devaient être mis en jeu par les roues d'un second moulin placé sur le pont Notre-Dame; la réception de cette machine fut faite en mai 1671.

En deux ans, on établit quinze nouvelles fontaines publiques, alimentées avec les eaux des machines que nous venons de signaler; le volume des eaux distribuées se trouve doublé, et la ville fait l'acquisition des deux moulins du pont Notre-Dame, 1673.

Malheureusement, les machines fonctionnaient d'une manière irrégulière; elles étaient souvent entravées par les glaces et les crues, et, faute d'entretien, leur puissance allait sans cesse en diminuant.

En 1695, nouvelle machine hydraulique, établie sous le pont de la Tournelle par Friquet de Vaurose.

En 1700, Rennequin, mécanicien célèbre, est chargé de réparer et même de reconstruire les machines du pont Notre-Dame.

La même année, Gaspard Boisson établit, dans le pavillon de l'Arsenal, un corps de pompe mis en jeu par un manége; l'eau qui en provenait devait alimenter la place Royale et le quartier du Temple.

En 1707, la machine de la Tournelle, qui ne donnait plus rien, fut démolie.

La même année, de Chamillart, contrôleur général des finances, fait élever la fontaine Louis-le-Grand; en 1713, on construit la fontaine Desmarets, au carrefour des rues Montmartre, Saint-Marc et Feydeau; et, en 1715, la Princesse palatine élève à ses frais la fontaine de la rue Garancière; en 1718, Joseph Chaudron en fait autant pour la fontaine du Chaudron, à la Villette.

En 1737, Bélidor est chargé de perfectionner les machines du pont Notre-Dame, et en porte le débit de 100 à 150 pouces.

De 1737 à 1740, les eaux de Belleville sont détournées des fontaines et employées au lavage du grand égout, qui, avant M. de Turgot, n'était qu'un simple fossé creusé dans les marais du Temple, du faubourg Saint-Denis, de la Chaussée-d'Antin, de la Ville-l'Évêque et des Champs-Élysées; quand les habitations s'étendirent de ce côté, le grand égout exhalait des odeurs méphitiques; on le nettoya par les eaux de Belleville, et on ne tarda pas à le voûter.

En 1737, deux étrangers présentent le projet d'une pompe à feu au moyen de laquelle on aurait élevé une certaine quantité d'eau sur la place de l'Estrapade.

En 1746, on érige la fontaine monumentale de la rue de Grenelle, due à Bouchardon; et un sieur Joseph Amy, avocat au parlement de Provence, présente deux machines propres, l'une à élever, l'autre à clarifier les eaux. — Le filtre était, paraît-il, composé d'éponges; il fut l'objet d'un rapport favorable des académiciens Réaumur et Granjean de Fouchy.

En 1761, les machines hydrauliques du pont Notre-Dame sont à nouveau réparées. En 1762, l'académicien Deparcieux propose d'amener à Paris, par un canal de dérivation, les eaux de l'Yvette, rivière qui prend sa source entre Ver-

sailles et Rambouillet, et tombe dans la rivière d'Orge, un peu au-dessus de Juvisy.

Ce projet fut combattu énergiquement par la compagnie qui sollicitait la concession de pompes à feu destinées à élever l'eau de Seine, 1765.

Lavoisier, en 1771, examina les deux projets; il montra que les pompes à feu seraient plus économiques pour obtenir un petit volume d'eau; mais que, pour un gros volume, l'aqueduc de dérivation devait avoir la préférence. — Cependant, en 1769, Perronet et Chezy avaient terminé les études du canal de l'Yvette, et ils donnèrent le projet complet en 1775. Le manque de fonds força d'ajourner l'exécution.

En 1776, MM. Périer frères obtinrent la concession de machines à feu destinées à prendre 150 pouces d'eau dans la Seine et à les élever dans des réservoirs convenablement placés. — Une compagnie, composée des principaux capitalistes de Paris, fut organisée en 1778, et, en 1782, on distribua les eaux des pompes à feu de Chaillot.

De 1778 à 1786, un agiotage effréné se porta sur les actions des eaux de Paris; ces actions atteignirent 5,000 livres, et Mirabeau signala dans un mémoire l'absurdité de pareils cours; l'expérience ne tarda pas à lui donner raison.

En 1787, l'entreprise des pompes à vapeur tombe en discrédit; un seul banquier se trouve en possession de la plupart des actions, et finit par vendre son privilége à la ville de Paris. — Une administration royale était établie pour surveiller les ouvrages et dépendances du service des eaux.

En 1788, on entreprend le canal de l'Yvette; le travail marche lentement, et se trouve interrompu par les événements de la Révolution.

La vente de l'eau aux particuliers est elle-même arrêtée.

En 1792, on nomme un ingénieur hydraulique de la commune de Paris.

En 1790, le sieur Brullée présente à l'Assemblée nationale le projet de dérivation des eaux de la Beuvronne, petite rivière qui coule au nord-est de Paris et se jette dans la Marne. — Une loi de 1791 en autorise l'exécution.

En 1800, les concessionnaires du canal de la Beuvronne modifient le projet et font remonter leur prise d'eau jusqu'à la rivière d'Ourcq, près de Lisy.

En mai 1802, est rendue la loi qui ordonne « qu'il sera ouvert un canal de dérivation de la rivière d'Ourcq, et qu'elle sera amenée à Paris dans un bassin près de la Villette »; un arrêté du Premier Consul confie l'exécution du travail aux ingénieurs des ponts et chaussées, et décide que la dépense sera prélevée sur le produit de l'octroi de Paris.

C'est, en effet, sous les ordres de Girard qu'a été construit le canal de l'Ourcq: le réservoir général est établi sur le plateau de la Villette; à partir du réservoir, on peut tracer, de l'est à l'ouest, au pied de la butte Montmartre, une ligne de niveau, c'est le premier aqueduc. — On peut étendre cette ligne de niveau du côté opposé, en contournant les collines de Belleville, Ménilmontant et Charonne; c'est le second aqueduc. — La dépense d'eau des aqueducs était fixée à 80,000 mètres cubes par 24 heures. — On trouvera, dans les mémoires de Girard les principales dispositions adoptées pour la distribution et les conduites : ces dispositions sont aujourd'hui sans intérêt.

État actuel des eaux de Paris. — M. l'ingénieur Huet a donné, dans un rapport sur l'Exposition universelle de 1867, une description sommaire de l'état du service des eaux de la ville de Paris. — Voici cette description :

« Paris s'est ressenti, plus que toute autre ville de France, de l'impulsion donnée par l'Empire à tous les travaux qui intéressent la santé et le bien-être

matériel des populations. Le programme général de son alimentation comme de son assainissement a été tracé par le préfet de la Seine, M. le baron Haussmann, dans un remarquable rapport de 1854.

« En 1854, Paris ne disposait, par jour, que de 148,000 mètres cubes d'eau, fournis pour la plus grande partie par le canal de l'Ourcq, création du premier Empire; et sur les 100,000 mètres cubes provenant de cette source d'alimentation, il ne pouvait, eu égard à l'insuffisance de son système de distribution, en utiliser que moitié; il ne jouissait donc réellement que de 90 à 100,000 mètres cubes d'eau par jour, soit de moins de 100 litres par habitant, pour une population qui s'élevait déjà à plus d'un million d'âmes. Aujourd'hui, il dispose d'un minimum de 213,000 mètres cubes d'eau par jour, et est en mesure d'en profiter par les améliorations apportées à sa distribution intérieure. Il est vrai que sa population est de 1,600,000 habitants, ce qui ne fait encore ressortir qu'à 139 litres par habitant la quantité d'eau dont il jouit dès à présent; mais les travaux se poursuivent. Dans trois ou quatre ans, ce chiffre sera porté à 200 litres environ par la dérivation des sources de la Vanne[1].

« L'administration municipale de Paris n'a rejeté aucune source d'alimentation. Tout en allant rechercher des eaux de source pour les besoins du service privé, à la suite des belles études hydrologiques du bassin de la Seine faites par le savant directeur actuel des eaux et égouts de la ville, M. l'inspecteur général Belgrand, elle a installé, depuis 1862, de nouvelles pompes à feu sur la Seine, en amont de Paris, et une usine hydraulique sur la Marne, à Saint-Maur; elle perce deux nouveaux puits artésiens; elle augmente le débit du canal de l'Ourcq par l'installation de deux usines hydrauliques utilisant des chutes de la Marne, pour refouler de l'eau dans le canal pendant la saison des basses eaux.

L'aqueduc de dérivation des sources de la Dhuis, aqueduc souterrain de 130 kilomètres de longueur, construit dans des conditions qui lui permettront d'amener à Paris jusqu'à 50,000 mètres cubes d'eau pour vingt-quatre heures, n'offre rien de remarquable que la simplicité et les principes d'économie qui ont présidé à sa conception et à son exécution.

Les parties en conduite libre, qui présentent une pente uniforme de $0^m,10$ par kilomètre, sont formées d'un cylindre ovoïde de $1^m,76$ de hauteur sur $1^m,40$ de largeur, en maçonnerie de meulière brute et de ciment de 20 centimètres d'épaisseur, y compris un enduit intérieur en mortier de ciment de 2 centimètres. La forme circulaire eût été la plus rationnelle au point de vue de l'économie, nous la verrons généralement adoptée; mais la forme ovoïde donnait, dans ce cas particulier, une hauteur qui permet la visite facile de l'intérieur de l'aqueduc. Cette visite peut se faire, sans interrompre complétement le service, à l'aide de petits batelets et en abaissant seulement le plan d'eau normal. Les parties en conduite forcée ou siphons, à la traversée des vallées, qui présentent un développement total de 17 kilomètres environ, sont composées d'un cours de tuyaux en fonte d'un mètre de diamètre intérieur.

Tous les ouvrages d'art, les ponts sur les rivières et cours d'eau rencontrés, les regards espacés de 500 mètres en 500 mètres environ sur tout le parcours de la dérivation, les déversoirs, etc., sont traités dans ces mêmes principes de simplicité et d'économie; tous sont en maçonnerie brute.

Cette dérivation a coûté 16 millions 1/2, dans lesquels sont compris 2 millions 1/2 d'acquisitions de terrain, de sources et d'indemnité d'usines; en ad-

[1] Cette dérivation est aujourd'hui terminée.

mettant qu'on dépense encore successivement de 2 à 3 millions pour l'exécution des dérivations secondaires qui doivent compléter les 50,000 mètres cubes d'eau en vue desquelles elle est établie, le prix du mètre cube d'eau par 24 heures, fourni par cet ouvrage ressortira à 380 francs, c'est-à-dire que le prix d'un mètre cube ressortira à $0^{f},052$.

L'usine hydraulique de Saint-Maur a été installée sur la Marne, près du confluent de cette rivière avec la Seine, en amont de Paris, afin d'utiliser la force hydraulique, résultant de la chute créée sur ce point par la coupure d'un circuit de la Marne, à élever de l'eau pour les services publics. Cette chute peut s'élever jusqu'à $4^{m},10$ en basses eaux, et son volume est celui de la Marne même, c'est-à-dire qu'il est de 5 à 6 mètres cubes au plus bas étiage.

Indépendamment de sa large et belle disposition, cette usine est remarquable par les nouveaux moteurs hydrauliques qui y sont installés, c'est-à-dire par les *roues turbines* de M. Girard. Les turbines ou roues à axe vertical adoptées jusqu'ici, tout en utilisant beaucoup mieux que des roues de côté ou à axe horizontal la force hydraulique, lorsque celle-ci est représentée par une chute et un volume d'eau à peu près constant, perdent notablement de leurs avantages lorsqu'elles ont à tirer parti d'un volume d'eau variable, pour compenser les variations de la chute ; la roue-turbine de M. Girard, sorte de turbine à axe horizontal, tout en gardant les avantages de ces moteurs hydrauliques, n'en présente pas les inconvénients ; elle peut compenser, par le débit d'un plus grand volume d'eau, la diminution de la chute, et, si son rendement est toujours le meilleur à l'étiage, c'est-à-dire pour la plus grande chute, son effet utile reste le même, malgré une diminution considérable de la hauteur de la chute.

A Saint-Maur, M. Girard a installé quatre roues turbines, de 12 mètres de diamètre et de 120 chevaux chacune ; à l'étiage, c'est-à-dire avec une chute de $4^{m},10$, elles ont donné un rendement de 64 pour 100 en eau montée; avec la diminution de la chute, leur rendement a diminué ; néanmoins, avec une chute réduite à 2 mètres, elles donnaient le même effet utile ; enfin, la chute diminuant encore, elles marchaient lorsque les deux turbines du système Fourneyron, de 100 chevaux chacune, qui complètent l'ensemble de l'usine, étaient arrêtées. Par un système ingénieux de fermeture et d'ouverture des vannes de l'appareil distributeur, ces grandes roues s'arrêtent et se mettent en marche avec la facilité et la rapidité des machines à vapeur les plus sensibles. Elles ne reviennent toutes posées, en y comprenant les pompes qu'elles commandent, qu'à 500 francs par force de cheval.

Si l'on comprend dans les dépenses de création de cette usine l'acquisition des moulins sur l'emplacement desquels elle est installée, les indemnités y relatives, l'ouverture de la dérivation souterraine qui crée la chute en coupant le circuit de la Marne, enfin les conduites de refoulement allant aux réservoirs de distribution, les 40,000 mètres cubes qu'elle peut élever en moyenne, par vingt-quatre heures, reviennent à 7,600,000 francs, ce qui fait ressortir à 190 francs le prix du mètre cube d'eau par vingt-quatre heures, soit à $0^{f},026$ le prix d'un mètre cube.

L'usine du quai d'Austerlitz, installée en 1864, nous montre enfin le type le plus récent des machines à vapeur et des pompes adoptées à Paris, pour l'élévation de l'eau destinée à l'alimentation d'une ville.

Cette usine, placée sur la rive gauche de la Seine, dans la partie amont de Paris, se compose de deux machines semblables, du système Woolf, d'une puissance de 120 chevaux sur l'arbre du volant à la vitesse de 18 tours par minute,

faisant marcher chacune deux pompes verticales de $0^m,10$ de diamètre, constituant un système à double effet. Ces pompes aspirent l'eau dans un puisard alimenté par un aqueduc de 120 mètres de longueur, qui va chercher au milieu de la Seine de l'eau toujours plus pure que celle des rives; cet aqueduc comprend ainsi 80 mètres de tuyaux en tôle de 0,80 de diamètre, immergés dans le lit de la Seine à 2 mètres en moyenne au-dessous de l'étiage. Les machines rendent jusqu'à 100 chevaux, en eau montée à 60 mètres de hauteur moyenne.

Elles peuvent donner, marchant ensemble, 22,000 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures. La dépense totale d'installation de l'usine, non compris les acquisitions de terrain a été de 710,000 francs; les machines seules ressortent à 1,430 francs environ par force de cheval.

Quant aux frais d'exploitation, ces machines travaillant continuellement vingt-quatre heures par jour, ils varient, par cheval utile en eau montée, de 900 à 1,000 francs par an. Le mètre cube d'eau ressort ainsi à $0^f,025$ ou à $0^f,033$ environ, en tenant compte de l'intérêt des dépenses de première installation. »

Eaux de la Dhuis. Réservoir de Ménilmontant. — Les eaux de la Dhuis, affluent du Surmelin, sont amenées par un aqueduc de 130 kilomètres de long, de 2 mètres de haut et de $1^m,40$ de large dans le réservoir de Ménilmontant, à $107^m,87$ au-dessus du niveau de la mer et à $81^m,62$ au-dessus de l'étiage de la Seine au pont de la Tournelle (fig. 2, pl. 14).

Ce réservoir est à deux étages:

L'étage supérieur est affecté aux eaux de la Dhuis, l'étage inférieur aux eaux de la Marne, refoulées par l'usine municipale de Saint-Maur.

L'étage supérieur contient 100,000 mètres cubes, lorsque la hauteur d'eau y est de 5 mètres, et l'étage inférieur contient 31,000 mètres cubes avec une hauteur variant, à cause de l'inclinaison du radier, de $1^m,50$ à $4^m,50$.

Dans les notices de l'Exposition de 1867, nous trouvons la description suivante des deux réservoirs :

« *Réservoir supérieur*. — En plan, ce réservoir affecte une forme demi-circulaire appuyée sur une partie rectangulaire. Le diamètre du cercle qui est de 188 mètres, forme le grand côté du rectangle dont l'autre dimension est de $42^m,50$.

Le réservoir est divisé en deux compartiments égaux et symétriques par un mur de refend, suivant le rayon qui est perpendiculaire au mur d'enceinte du côté de la rue de Vincennes.

Le réservoir est construit en déblai dans les marnes vertes.

Les fondations des murs de pourtour et du mur de refend traversent toute la couche de ces marnes; elles ont été descendues jusqu'au terrain gypseux, sur lequel elles reposent. En fondation, les murs de pourtour et de la partie du mur de refend qui n'est pas comprise dans le réservoir inférieur, sont évidés par des arcades.

Les murs de pourtour ont $1^m,40$ d'épaisseur en couronne. Le fruit intérieur est d'un cinquième pour les murs au-dessous du sol; pour les murs en déblai, le parement extérieur est vertical.

Les parements intérieurs sont verticaux, mais ils se raccordent avec le radier par un solin de 2 mètres de rayon.

Le mur de face du côté de la rue de Vincennes, qui est en partie en élévation, est épaulé par des terres en forme de talus.

Le radier est formé par un système de voûtes d'arêtes en plein cintre pour la partie qui recouvre le réservoir de la Marne, en arc de cercle pour les autres

parties du réservoir. L'intrados de ces dernières voûtes est appuyé sur les marnes. Ces voûtes ont 0m,40 d'épaisseur à la clef; elles sont supportées par des piliers qui sont espacés de 6 mètres d'axe en axe.

Le réservoir est couvert par une toiture formée de voûtes d'arêtes surbaissées au neuvième.

Les voûtes sont faites de deux rangs de briquettes, posées à plat avec mortier de ciment.

Elles reposent sur des piliers carrés ayant 0m,60 de côté à la retombée. Ces piliers sont montés à l'aplomb de ceux des fondations du radier.

Les voûtes en briquettes ont environ 0m,08 d'épaisseur, chape comprise. Elles sont recouvertes par une couche de terre gazonnée de 0m,40 d'épaisseur.

Les conduites de départ ont 1 mètre de diamètre; elles sont disposées de telle sorte que le service peut être fait isolément par chacun des compartiments ou par l'aqueduc.

La décharge permet de vider les eaux dans le réservoir des eaux de la Marne. Le tuyau de trop plein, dont l'orifice est placé à 5 mètres au-dessus du radier, dégorge également dans le réservoir inférieur.

Réservoir inférieur. — Le réservoir des eaux de la Marne est placé sous celui des eaux de la Dhuis ; il n'occupe que la partie centrale des soubassements de ce dernier.

Il a la forme d'un rectangle dont la grande dimension, parallèle au mur de façade, a 104 mètres de longueur sur 90 mètres de largeur dans l'œuvre.

Il est divisé en deux compartiments égaux et symétriques par le mur de refend dont il a été parlé au sujet du réservoir supérieur.

Chaque mur d'enceinte du réservoir est construit dans le milieu et suivant la direction d'une même travée des voûtes qui supportent le radier supérieur.

Ces murs ont 1m,20 d'épaisseur ; leur parement du côté des terres est vertical, à l'intérieur il est également vertical, mais il est raccordé avec le radier par un solin de 2 mètres de rayon.

Leur couronnement constitue une galerie qui permet de circuler librement autour des bassins.

Le radier suit la pente naturelle des marnes blanches du gypse; son épaisseur est de 0m,30.

Les piliers carrés qui supportent les voûtes, ont 1m,25 de côté à la naissance et 1m,75 à la base.

Les conduites de refoulement des pompes de Saint-Maur, déversent leurs eaux dans une bâche de répartition en communication avec les deux compartiments du réservoir.

La conduite de départ a 0m,80 de diamètre ; elle est disposée de telle sorte que le service peut être fait isolément par chaque compartiment.

Les maçonneries des radiers, les piliers des bassins inférieur et supérieur, les voûtes qui recouvrent le bassin inférieur sont construits en meulière.

Les murs de pourtour et d'enceinte sont en moellons avec revêtements en meulière.

Tous les parements intérieurs ont été rocaillés en mortier de ciment, avant de recevoir l'enduit en même mortier dont l'épaisseur est variable ; elle est de 0m,025 au couronnement des murs et de 0m,035 à leur base et sur les radiers ;

Les réservoirs de Ménilmontant ont coûté 3,640,000 francs.

La capacité totale des réservoirs étant de 131,000 mètres cubes, le mètre cube de capacité revient à 27f,98. »

Eaux de la Vanne. — La Vanne est un affluent de l'Yonne; les sources de cette rivière sont recueillies et amenées à Paris par un aqueduc de 155 kilomètres de long, dont la dépense a été évaluée à 30 millions de francs.

L'aqueduc traverse les vallées de l'Yonne, du Loing à Moret, passe près de Fontainebleau, traverse la vallée de l'Essonne à Mennecy, puis la vallée de la Bièvre sur l'ancien aqueduc d'Arcueil et débouche dans les réservoirs de Montsouris.

Les renseignements nous font défaut sur cette importante construction; nous donnerons seulement les coupes en travers des principales sections de l'aqueduc, construit partie avec mortier de ciment *a*, *a*, partie avec mortier de chaux *b*, *b* figures 4 et 5, planche 14.

Pour la section intérieure, on a adopté la forme circulaire, la plus favorable, comme on sait, à l'écoulement, celle qui, pour un cube donné, a le moindre périmètre et, par suite, consomme le moindre volume de maçonnerie.

M. l'inspecteur général Belgrand publie en ce moment une description complète des Eaux de Paris, qui sont, pour ainsi dire, son œuvre propre ; nous engageons le lecteur à vouloir bien se reporter à cet ouvrage. Dans un traité élémentaire comme le nôtre, nous ne pouvons aborder les détails de ces travaux exceptionnels.

Considérations générales sur les aqueducs de dérivation. — Lorsqu'il s'agit d'établir un aqueduc de dérivation, le point de départ est toujours donné et ne peut être changé; il en est presque toujours de même du point d'arrivée.

La pente par mètre ou la perte de charge est donc connue, et les formules de M. Bazin, rappelées dans notre *Hydraulique*, permettent de calculer la section que devra présenter l'aqueduc pour débiter le volume demandé.

Cependant, il arrive quelquefois qu'on jouit d'une certaine latitude pour l'emplacement du réservoir de distribution. Dans ce cas, il va sans dire qu'il ne faut pas le placer à un niveau beaucoup plus élevé qu'il n'est nécessaire, car on se trouverait entraîné à des augmentations de dépense pour la construction de l'aqueduc et l'établissement des conduites; mais il ne faut pas se borner non plus à l'altitude strictement nécessaire, car on se ménagerait alors des mécomptes pour l'avenir.

La vitesse d'écoulement dans un aqueduc de dérivation est proportionnelle à la racine carrée de la pente; c'est dire qu'il n'y a pas un grand intérêt à rechercher les pentes considérables.

Cependant, il faut que la pente soit assez forte pour imprimer à l'eau une certaine vitesse, afin que son voyage de la source au réservoir ne dure pas trop longtemps. Si l'eau n'avait qu'une vitesse de $0^m,10$, elle parcourrait 1 kilomètre en 10,000 secondes ou en deux heures quarante-six minutes; elle mettrait onze jours à parcourir un aqueduc de 100 kilomètres; elle perdrait pendant ce temps toutes ses qualités et pourrait même se corrompre.

Genieys prétendait que la vitesse ne devait jamais être inférieure à $0^m,35$. Cette limite est beaucoup trop élevée. On comprend, du reste, qu'elle dépend essentiellement de la longueur de l'aqueduc.

Les aqueducs ou rigoles en terre ne doivent être adoptés que pour des dérivations de grande importance, destinées à former en même temps des canaux de navigation; il est difficile de maintenir dans une rigole en terre, ou même dans une rigole en maçonnerie, les qualités de l'eau potable.

Les aqueducs de dérivation doivent être exécutés en maçonnerie et voûtés ; il

faut les enfouir dans le sol ou les couvrir d'une chemise en maçonnerie suffisamment épaisse. On doit tendre le plus possible à se rapprocher de la section circulaire; en tous cas, il faut supprimer les angles et les remplacer par des solins. Au passage des vallées on évitera les aqueducs en maçonnerie, généralement dispendieux, et on aura recours aux conduites forcées qui pourront être placées, au passage des cours d'eau, sur un pont-aqueduc de faible hauteur.

CHAPITRE V

DISTRIBUTIONS D'EAU PAR MACHINES ÉLÉVATOIRES

Considérations générales. — Il est rare de rencontrer à proximité d'une ville une source abondante ou une rivière qu'il soit possible de dériver par la pente naturelle du sol.

Le plus souvent, les eaux se trouvent en contre-bas de tout ou partie de la ville, et il est nécessaire de recourir à des machines élévatoires.

Dans notre *Traité des machines*, nous avons décrit les appareils qui servent à élever l'eau: bélier hydraulique, norias, chapelets, tympans, pompes.

Le bélier hydraulique peut rendre de sérieux services pour l'alimentation d'une propriété particulière, mais les chocs perpétuels, qui sont le principe même de l'appareil, en compromettent la durée, et il ne saurait être établi sous de fortes dimensions.

Les norias, chapelets et tympans ne servent que pour les irrigations et, en général, pour élever de grandes quantités d'eau à de faibles hauteurs.

Le seul appareil usuel, applicable à tous les cas, c'est la pompe aspirante et foulante : nous avons donné la théorie et la description des principaux systèmes de pompes, et nous ne pouvons revenir sur ce sujet; nous signalerons seulement les qualités à rechercher dans les pompes puissantes, destinées aux grandes distributions d'eau.

Les pompes, mues à bras d'hommes ou par un manége, ne peuvent convenir qu'à des exploitations industrielles, intermittentes. Les seuls moteurs à employer sont les moteurs hydrauliques ou les machines à vapeur.

Généralement, le moteur hydraulique, quelle que soit la dépense de premier établissement, est plus économique que la machine à vapeur; mais on n'a pas toujours des chutes à sa disposition.

Il va sans dire qu'on doit rechercher les appareils qui donnent le meilleur rendement; sur ce point encore, nous renverrons au *Traité des machines*.

Puissance de la machine. — La première chose à connaître, c'est la puissance qu'il convient de donner aux machines.

On doit élever un volume de V litres par seconde à une hauteur H, cela donne lieu à un travail VH; mais, la hauteur H doit être augmentée de la perte de charge (h) produite par le mouvement de l'eau dans une conduite de longueur et de diamètre connus, de sorte que le travail à produire est $V(H+h)$.

Les pompes elles-mêmes absorbent une partie du travail qui leur vient du

moteur; si $\left(\frac{m}{n}\right)$ est leur rendement, le travail à leur transmettre sera égal à

$$\frac{n}{m} V (H+h)$$

Enfin, le moteur lui-même absorbe une partie du travail qu'il reçoit; désignons son rendement par $\frac{m'}{n'}$, le travail à demander à la puissance motrice sera finalement égal à

$$\frac{n'}{m'} \cdot \frac{n}{m} V (H+h)$$

Ce travail est exprimé en kilogrammètres; on en aura la valeur en chevaux-vapeur en le divisant par 75.

Exemple : On doit élever 500 mètres cubes d'eau par 24 heures, à 30 mètres de hauteur, au moyen d'une conduite de 1,500 mètres de long, quelle devra être la puissance de la machine?

500 mètres cubes d'eau en 24 heures représentent 5 litres, 8 par seconde. Adoptons une conduite de $0^m,162$ de diamètre, de $0^m,081$ de rayon :

La section d'écoulement sera de.	$0^{mq},0206$
Le débit étant de..	$0^{mc},0058$
La vitesse moyenne u sera égale à.	$0^m,28$

et la perte de charge, déduite de la formule $rj = b_1 u^2$, dans laquelle on prend pour b_1 le nombre 0,001172, est égale à $0^m,00113$ par mètre courant, soit, pour 1,500 mètres de conduite, une perte de charge totale de $1^m,69$.

Le travail à produire, par seconde, sera donc $5,8 \times 31,69$, ou 184 kilogrammètres. Si le rendement des pompes est de 0,6, le travail transmis à leur arbre devra être de 306 kilogrammètres.

La puissance effective de la machine à vapeur devra atteindre, par conséquent, $\frac{806}{75}$, ou 4 chevaux-vapeur;

Et, si le rendement de la machine à vapeur est de $\frac{2}{3}$, sa force nominale devra être de six chevaux. Le rendement est plus voisin de 0,6 c'est-à-dire de $\frac{3}{5}$ que de $\frac{2}{3}$.

Réservoir d'air. — Chaque coup de piston de la pompe produit dans la colonne un mouvement ascensionnel, et le retour du piston détermine un arrêt brusque. De là, production de chocs qui ne tarderaient pas à être désastreux pour les appareils, vu la grandeur de la masse en mouvement; on peut régulariser le mouvement en montant sur le même arbre deux pompes, dont les bielles sont calées à angle droit ou trois pompes avec bielles calées à 120° (voir le *Cours de machines*); mais, ces précautions ne suffisent pas, et il est indispensable de placer à la base de la conduite ascendante un réservoir d'air comprimé, qui sert de régulateur et qui, à chaque instant, emmagasine l'excès de travail ou comble le déficit, de manière à maintenir le mouvement uniforme de l'eau dans la conduite.

Ce réservoir d'air comprimé est une grande cloche en fonte; on l'alimente

par une pompe à air, montée sur l'arbre des pompes à eau ; l'alimentation continue est nécessaire, car l'air est sans cesse entraîné et dissous par le courant liquide.

Pour éviter l'effet pernicieux des chocs, il faut réduire le plus possible la force vive de la masse en mouvement, c'est-à-dire qu'il faut tendre à diminuer la vitesse moyenne de l'eau dans la conduite ; on y arrive en adoptant d'assez forts diamètres. Cependant, avec un bon réservoir à air, les grands diamètres ne sont pas aussi nécessaires.

Nécessité d'un double système dans une grande ville. — Les moteurs et les pompes doivent, à des intervalles plus ou moins éloignés, être mis en chômage pour être visités, réparés et nettoyés. En dehors de ces circonstances, un accident peut survenir qui interrompe le fonctionnement des appareils.

Or, un service de distribution d'eau ne peut chômer, car, lorsqu'il a été établi depuis quelque temps dans une ville, il ne reste plus rien pour le remplacer.

Donc il est indispensable d'avoir double moteur, double système de pompes; une double conduite est moins nécessaire.

C'est un point qu'il convient de ne pas perdre de vue, notamment dans les grandes villes; pour des distributions secondaires, la condition principale d'établissement est, en général, l'économie ; on pourra donc se contenter d'abord d'un moteur unique et d'une conduite unique; en somme, les réparations ne sont jamais bien longues ni bien difficiles, et, presque toujours, l'ennui d'un léger chômage éventuel ne saurait être comparé aux charges résultant d'un grand excès de dépense.

1° EAUX DE TOULOUSE.

Le créateur des fontaines de Toulouse est d'Aubuisson, qui en a rendu compte dans un excellent mémoire que nous allons résumer ici.

La quantité d'eau nécessaire avait été fixée à 200 pouces d'eau, soit environ 80 litres par tête. A la suite d'un concours, on décida de recourir aux machines élévatoires et de prendre l'eau de la Garonne, filtrée naturellement dans les sables des rives. Nous avons décrit ce filtrage naturel à la page 86, et les aqueducs de captation sont représentés par les figures 5 et 6 de la planche 2.

La figure 3 de la planche 8 représente la coupe en travers de l'édifice qui renferme les roues hydrauliques motrices et les pompes, et qui est surmonté d'une tour ou château d'eau.

On voit à la base de l'édifice, de chaque côté, deux roues à palettes dont le squelette était en fer et fonte et les aubes en bois ; ces roues sont mises en mouvement par une dérivation de la Garonne.

Chacune d'elles fait mouvoir quatre pompes à piston-plongeur, deux de chaque côté ; les eaux sont refoulées par chaque moteur dans deux tuyaux qui se réunissent, à une certaine hauteur, dans une conduite verticale unique, laquelle verse ses eaux dans la cuvette en fonte surmontant le château d'eau, fig. 4.

Ce château d'eau est situé sur la rive gauche de la Garonne ; de sa cuvette partent deux conduites, indiquées par la coupe en travers, qui passent sous le pont de la Garonne et se rendent vers le milieu de la ville dans une cuve de distribution ; de chaque côté de cette cuve partent deux conduites : le premier groupe

des deux conduites alimente le réservoir de la place des Carmes; le second groupe alimente le réservoir de la place Royale. — Les deux places ainsi désignées sont les deux centres de la ville; chaque réservoir alimente la zone qui lui correspond.

En établissant double conduite sur les grandes artères, d'Aubuisson a voulu parer à toutes les éventualités de chômage; le double moteur s'explique par la même raison.

L'établissement de la distribution d'eau de Toulouse a entraîné une dépense totale de 1,161,943 francs.

Inutilité du château d'eau. — Le château d'eau avait pour but de réduire, dans une proportion considérable, la masse du liquide à mettre en mouvement à chaque coup de piston.

On évitait ainsi les chocs violents, et c'était une bonne précaution, vu l'absence de réservoir d'air comprimé.

Aujourd'hui, on établirait à la base des conduites de refoulement un réservoir d'air comprimé, on supprimerait le château d'eau et on enverrait directement les eaux aux deux bassins de la place Royale et de la place des Carmes, au lieu de les monter d'abord à la hauteur voulue pour les laisser descendre ensuite sous l'action de la pesanteur.

2° EAUX DE MARLY ET DE VERSAILLES[1].

Sous Louis XIII, Versailles était alimenté par des eaux élevées de la Bièvre et de l'étang de Clagny. — En 1662, Louis XIV fit installer des pompes plus puissantes dans une tour octogone, au sommet de laquelle était un réservoir; les pompes élevaient l'eau de l'étang de Clagny, et du réservoir elle se rendait aux fontaines du jardin.

Mais il fallut bientôt songer à se créer de plus sérieuses ressources : Riquet proposa de dériver la Loire, mais il eût fallu aller la chercher à la Charité, et encore l'altitude des plateaux de la Beauce eût-elle été trop faible. — On projeta aussi une dérivation de la Seine, dérivation impossible.

Cependant un nivellement précis démontra qu'à l'ouest de Versailles s'étendait un vaste plateau argileux présentant, à Trappes et à Bois-d'Arcy, deux dépressions dont le fond était à 7 ou 8 mètres au-dessus du réservoir de la tour dont nous avons parlé tout à l'heure. Ces dépressions furent transformées en étangs : on y fit arriver de nombreuses rigoles d'alimentation et, par un aqueduc spécial, on en amena les eaux jusqu'à Versailles, où elles arrivèrent en 1675.

Les eaux des étangs portent le nom d'eaux blanches, à cause de la couleur blanchâtre qu'elles conservent; elles sont impropres aux usages domestiques, on les réserve pour les pièces d'eau.

Pour l'alimentation, on conserva les eaux de source, auxquelles on ajouta celles de Roquencourt.

En 1675, Colbert fit installer, par le baron Deville et le charpentier Rennequin,

[1] Voir le mémoire intitulé : *Études sur les eaux de Marly et de Versailles*, par M. Vallès, inspecteur général des ponts et chaussées, mémoire inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1864.

la machine de Marly qui, d'abord destinée à alimenter seulement le parc de Marly, ne tarda pas à envoyer à Versailles la plus grande partie de ses eaux.

Le système de Marly comprenait :

1° Un barrage réunissant les diverses îles de la Seine et créant une chute ;

2° 14 roues hydrauliques de 12 mètres de diamètre ;

3° 221 pompes aspirantes et foulantes, étagées à flanc de côteau.

En bas, 64 pompes élevatoires envoyaient, par 5 conduites de $0^m,221$ de diamètre, les eaux dans des puisards placés à 50 mètres au-dessus de la Seine ; 79 pompes les reprenaient et les portaient à $50^m,75$ plus haut ; enfin, un 3e étage de 78 pompes les reprenaient encore et les envoyaient définitivement à $154^m,70$ au-dessus du niveau de la Seine, au sommet du long aqueduc de Marly, monument dont l'utilité ne se comprend guère aujourd'hui. — L'espace parcouru en plan était de 1,256 mètres.

On connaît le système de renvois de mouvement : nous l'avons décrit en mécanique ; il est connu sous le nom de système de tiges et de varlets. Les varlets, fixés au sol et oscillant autour de leur point d'appui, s'articulent avec les tiges contiguës et les soutiennent ; tout le système est animé par l'arbre des pompes d'un mouvement de va-et-vient qui ne tarde pas à produire un énorme ferraillement et à mettre les pièces hors d'usage.

L'aqueduc amenait les eaux à Versailles, au réservoir de la Butte-de-Picardie, d'où elles passaient, par un aqueduc aérien, dans le réservoir de Montbauron ; aujourd'hui l'aqueduc aérien a disparu et est remplacé par une conduite forcée.

Le volume donné par la machine de Marly était primitivement de 250 pouces fontainiers ; il se réduisit en peu de temps à 60 pouces ou 1,130 mètres cubes par jour.

En 1684, on commença la dérivation de l'Eure, qu'on prenait à Pont-Gouin, à 7 ou 8 lieues au delà de Chartres. 30,000 hommes furent employés aux travaux et creusèrent, jusqu'à Berchère-le-Mangot, un canal de 5 mètres de large et de 3 mètres de profondeur sur 40 kilomètres de long. Les mouvements de terre humide produisirent leur effet habituel et engendrèrent des maladies qui se propagèrent facilement dans une aussi grosse agglomération d'ouvriers. — Les travaux furent abandonnés en 1687, sous le coup des embarras de tout genre que suscitait la ligue d'Augsbourg.

En 1680, on avait amené, par l'aqueduc de Buc jusqu'aux réservoirs Gobert, les eaux de l'étang de Saclay, qui arrivaient à 13 mètres au-dessus du réservoir de Montbauron.

Au dix-huitième siècle, l'état des choses ne se modifia guère, et, en 1803, la machine de Marly n'élevait plus que 12 pouces d'eau par jour.

En 1804, le charpentier Brunet mit en mouvement, au moyen de la 14e roue hydraulique, une pompe qui élevait l'eau d'un seul jet de la Seine à l'aqueduc de Marly, et qui, seule, donnait 10 pouces d'eau par jour.

Mais le système Brunet ne fut pas généralisé d'abord ; on préféra une machine à vapeur, qui ne fut définitivement installée qu'en 1826. — En 1817, on avait adapté à deux des roues hydrauliques des pompes du système Brunet.

En 1852, l'établissement comprenait : 2 roues de 12 mètres, actionnant des pompes et élevant 850 mètres cubes par jour ; une machine à vapeur fonctionnant d'une manière intermittente, et pouvant élever 1,800 mètres cubes en 24 heures.

Le prix de revient de l'eau fournie par la machine à vapeur était d'au moins

$0^{fr},23$, tandis qu'on pouvait réduire ce prix à $0^{fr},037$ en faisant usage des moteurs hydrauliques.

On résolut donc, sur l'avis d'une commission spéciale, d'installer trois moteurs hydrauliques : on avait d'abord songé aux turbines; mais les turbines ne fonctionnent bien qu'avec une vitesse notable; or, dans le cas actuel, il s'agit d'élever de l'eau d'un seul jet à une hauteur de 150 mètres; la pression à exercer sur le piston des pompes est donc supérieure à 15 atmosphères; pour éviter les chocs il faut une marche modérée; il convient donc de recourir à un moteur à mouvement lent. Ce sont les grandes roues de côté qui remplissent le mieux ces conditions et qui permettent d'actionner directement les pompes sans l'intermédiaire d'engrenages.

Depuis 1856, le volume emprunté à Marly a sans cesse augmenté, bien qu'on ait conservé les étangs, qui n'ont pas été rendus à la culture, ainsi que quelques personnes le demandaient. Toutes les idées, dit M. Vallès, sont en effet portées vers la nécessité de donner un plus grand développement à la distribution d'eau dans les villes. A l'est comme à l'ouest de Versailles, il existe deux rûs, réceptacle naturel des égouts de la cité, et l'on aura peine à comprendre que tant d'impuretés puissent subsister de nos jours; on sera du moins édifié sur la nécessité d'un prompt remède. « Car, non-seulement les eaux infectées empoisonsonnent l'air par leurs miasmes corrompus, mais elles affectent gravement l'hygiène du corps, parce que, faute d'autres ressources, on lave beaucoup de linge dans ce liquide, quelqu'impur qu'il soit. »

En 1868, la consommation de Versailles a été de 8,000 mètres cubes par jour. — Le volume nécessaire au jeu des grandes eaux est chaque fois de 7,000 mètres cubes.

La figure 1,2, de la planche 8, représente le profil en long des conduites ascensionnelles depuis la Seine jusqu'au réservoir des Deux-Portes, situé près de l'aqueduc de Marly; les eaux arrivant à l'origine de cet aqueduc le suivent en coulant dans une cuvette en plomb de 603 mètres de long et de $0^{m},00015$ de pente; arrivées à l'extrémité, elles descendent par une conduite souterraine et siphonnent pour gagner le réservoir. Cette disposition est très-vicieuse, car la charge du siphon est trop faible et il s'engorge : l'aqueduc de Marly est un monument inutile.

La machine à vapeur de 64 chevaux a été conservée comme renfort; c'était, en 1826, un appareil remarquable; il est très-mauvais aujourd'hui, puisqu'il consomme 7 kilogrammes de charbon par cheval et par heure.

Nous donnons, d'après le *Mémoire* de M. Vallès, deux coupes en travers des moteurs hydrauliques et des pompes, avec le détail des appareils, planche 8, figures 5 à 10 :

p, aubes planes au nombre de 64, constituant une des 4 roues de 12 mètres de diamètre et de $4^{m},50$ d'épaisseur; ces aubes en bon bois d'orme sont assemblées entre elles et fixées, par des équerres en fer, à deux rangées *ee'* de couronnes concentriques en fer;

b, boulons qui réunissent les aubes à la circonférence extérieure et aux deux bouts ;

E, bras en bois sur lesquels sont boulonnées les couronnes *ee'* ;

D, tourteau en fonte dans lequel s'assemblent les bras E;

A, arbre de transmission en fer forgé ;

B, paliers en fonte;

C, plaque de fondation en fonte.

Chaque roue actionne de chaque côté deux pompes horizontales, à piston plongeur, à simple effet, fig. 7 et 8 :

H, cylindre en fonte de la roue, de 0^{m},45 de diamètre extérieur, alésé intérieurement à 0^{m},39; de chaque côté ce cylindre porte des empâtements I venus de fonte, qui servent à le fixer au bâti I', boulonné sur la plaque de fondation ;

K, piston plongeur avec son stuffing box *h'* ;

L, chape en tête du piston traversée par un petit arbre en fer forgé L', garni à ses extrémités de coulisseaux en bronze *l*, se mouvant horizontalement sur les glissières en fonte *l*, fig. 9;

Sur l'arbre L' vient s'attacher la bielle *a'*, actionnée par une manivelle montée sur l'arbre de la roue ; il y a donc deux manivelles à chaque extrémité de l'arbre A ;

k, fond du piston plongeur, rapporté et ajusté après le moulage ;

H' boîte à deux tubulures, venue de fonte avec le cylindre ;

h^2, bride en fonte fixant le tuyau d'aspiration M ;

N, siége du clapet O, tous deux en bronze ;

n, rondelle de bois d'orme debout, appuyée sur la gorge circulaire du siége ;

n', butoirs servant de limite à l'ascension du clapet ;

Q et Q', clapets de refoulement avec charnières *p* ; ces clapets en bronze s'appuient sur le double siége incliné en bronze, R ;

S, regard permettant la visite des clapets ;

Après la boite P, qui contient les clapets de refoulement, est placé un robinet vanne P', qui permet d'interrompre la communication d'une pompe avec l'une des conduites collectives U,U' ;

Ces conduites sont sur la longueur du bâtiment, sous une plateforme en fonte U^2; elles communiquent avec deux grands réservoirs en fonte VV', à air comprimé ;

Sur le couvercle H^2 de la boîte des clapets d'aspiration, est fixé l'appareil à comprimer l'air *o*, qui se compose de : figure 10;

o, petite cloche en fonte avec robinet *o'* ;

r, disque en cuir recouvrant la bride supérieure du robinet, laquelle est percée de petits trous ;

s, petit tube qui, à chaque mouvement en arrière du piston, laisse entrer l'air extérieur aspiré en même temps que l'eau par le tube M, fig. 7 ;

Quand le piston revient en avant, l'air refoulé soulève la plaque de cuir *r* et pénètre dans le cylindre *o* ;

L'air comprimé à 16 ou 17 atmosphères s'en va par le tuyau *t* dans le tuyau collecteur *t'* qui le conduit à un des réservoirs V ;

De l'eau est aspirée en même temps que l'air, sa présence est accusée par le tube indicateur *o''*, qui porte un robinet purgeur servant à l'évacuation.

Les canaux d'alimentation où plongent les tuyaux d'aspiration M, sont fermés à l'aval par une vanne *m'* afin de ne point laisser échapper le courant du fleuve ;

m_2, grille en aval du canal d'alimentation ;

G', vannes de prise d'eau en forte tôle, manœuvrées par un treuil, dont F est le bâti, et *f* l'arbre à manivelle ; cet arbre porte un pignon qui commande une roue dentée, montée sur un second arbre du bâti ; le pignon de ce second arbre commande la roue G, dont l'arbre porte, à ses extrémités, deux pignons engrenant avec les crémaillères *h* de la vanne ;

G^2, grillage s'opposant au passage des matières solides ;

Des expériences, faites à la vitesse moyenne de 2 tours 1/2 des roues hydrau-

liques, par minute, ont donné pour l'ensemble des 3 roues fonctionnant, 80 litres 1/4 par seconde, soit 6,940 mètres cubes par jour;

Le rendement de la machine, en calculant le travail de la chute, était de 51 p. 100 ; c'est un résultat satisfaisant.

3° EAUX DE LYON[1].

Les eaux de Lyon proviennent d'une galerie de filtration creusée dans la plaine du petit Broteau, sur la rive droite du Rhône, à l'amont de Lyon. On en trouvera la description page 87.

La plaine du petit Broteau est à 5 ou 6 mètres au-dessus de l'étiage, donc facile à mettre à l'abri des crues ; le sous-sol est composé d'une masse de sables et graviers purs et perméables, fournissant une bonne eau potable.

La galerie de filtration de 120 mètres de long et de 5 mètres de large, doit être complétée par deux bassins filtrants.

Les eaux sont réunies dans un puisard commun d'où elles sont extraites par trois machines à vapeur, ayant chacune une puissance de 170 chevaux.

On peut subdiviser le service en trois services distincts :

1° Le *bas service*, qui comprend la plus grande partie de la ville et qui est alimenté par un réservoir de 10,000 mètres cubes de capacité placé sur le coteau, immédiatement au-dessus de l'usine hydraulique; les eaux sont refoulées à ce réservoir par une conduite de 0^m92 de diamètre. Le réservoir communique par une conduite de $0^m,60$ de diamètre, avec un réservoir de 4,000 mètres cubes, construit dans l'intérieur de la ville, à l'emplacement de l'ancien Jardin des plantes, et destiné à satisfaire aux nécessités de l'arrosage public ; ce réservoir a pour effet, comme nous l'a enseigné la théorie, d'augmenter considérablement la puissance de la distribution ;

2° Le *moyen service*, qui est alimenté par un réservoir de 4,000 mètres cubes, placé au sommet du coteau de Montessuy ; il reçoit les eaux par une conduite de $0^m,60$ de diamètre ;

3° Le *haut service*, destiné à atteindre les hauteurs de Fourvières ; les eaux du moyen service sont reprises au réservoir de Montessuy, et refoulées par une machine à vapeur, au sommet d'une colonne en fonte de 55 mètres de hauteur ; cette colonne est surmontée d'un réservoir en tôle d'où les eaux s'échappent par une conduite qui descend des hauteurs de la Croix-Rousse, sur le pont de Nemours, pour remonter en siphon renversé sous une pression de plus de 13 atmosphères sur le coteau de Fourvières. Là, elles s'épanchent dans un réservoir de 1,000 mètres cubes de capacité.

Les quatre réservoirs précités alimentent un réseau de conduites de 90 kilomètres de long, dont les diamètres varient de $0^m,60$ à $0^m,081$.

Le système a été complété par la création de 20 kilomètres d'égouts.

[1] *Les eaux de Lyon et de Paris*, par A. Dumont, ingénieur des ponts et chaussées, 1 volume avec atlas, chez Dunod, éditeur. M. Dumont a constamment et énergiquement défendu le système de l'élévation des eaux de rivière, clarifiées par des filtres naturels ou artificiels.

La dépense totale s'est élevée à..	8,884,157f 18
Dans laquelle somme il faut compter :	
La canalisation et ses dépendances, bouches, bornes fontaines, etc. pour soit 32 francs par mètre courant.	2,884,592
Les égouts pour 80 francs par mètre courant..	1,616,800
L'usine, ses dépendances et son atelier pour.	500,000
Les machines à vapeur et appareils supplémentaires pour..	707,238
Le réservoir du moyen service pour.. soit 32 fr. 20 par mètre cube.	193,224
Le réservoir du Jardin des plantes pour. soit 52 francs par mètre cube.	207,702
Le système filtrant pour...	500,000

Système des machines. — Les machines sont du système de Cornouailles, à détente et à condensation, chacune de la force de 170 chevaux.

Leur marche normale est de huit coups de piston à la minute ; ce nombre peut, sans inconvénient, être porté à dix ou réduit à six.

Elles font mouvoir des pompes aspirantes et foulantes à simple effet. Le piston de la pompe du bas service a 1 mètre de diamètre et 2m,50 de course ; son débit théorique est de 2m,17 par coup de piston et son débit réel 1m,80.

Le piston de la pompe du moyen service a 0m,60 de diamètre et 2m,50 de course. Le débit théorique est de 0m,70 et le débit réel de 0m,60.

Les eaux refoulées passent au pied de réservoirs à air de 2 mètres de diamètre et de 15 mètres de hauteur.

Nous renverrons à notre *Traité des machines à vapeur*, pour la description des machines de Cornouailles, système de Woolf, à détente et à condensation.

Ces machines perfectionnées peuvent arriver à ne consommer qu'un kilogramme de bonne houille par cheval et par heure, ce qui représente 270 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur.

Les pompes sont placées à 9m,20 au-dessus de l'étiage du Rhône ;

Le réservoir du bas service est à la cote.	45,70
Le réservoir du Jardin des plantes.	34,10
Le réservoir du service moyen.	87,92

Colonne en fonte de Montessuy. — La colonne en fonte de Montessuy a une hauteur de 55 mètres, depuis le dessus du soubassement en maçonnerie qui la supporte jusqu'au fond du réservoir en tôle qui la surmonte.

Cette colonne est analogue aux grandes piles des viaducs métalliques ; elle est formée d'un faisceau pyramidal de montants en fonte, entretoisés et contreventés par des croix de Saint-André, en fer forgé.

Elle pèse 60 tonnes : 44 tonnes de fonte, 13 de fer et 3 de tôle ; elle a coûté, mise en place, 40,000 francs.

Au milieu de la colonne se trouvent deux conduites : l'une montante, de 0m,60 de diamètre, conduit au réservoir en tôle du sommet l'eau refoulée par la machine établie au pied de la colonne. L'autre conduite, de 0m,40 de diamètre, reçoit l'eau descendante qui s'engage dans le siphon renversé, la conduisant au réservoir de la Sarra sur les hauteurs de Fourvières.

Un escalier en spirale, entièrement métallique, entoure la grosse conduite de 0m,60 et permet de monter jusqu'au sommet du réservoir en tôle.

4° EAUX DE NIMES [1].

Sous les Romains, Nîmes était alimenté par une dérivation des sources d'Eure, amenées dans la ville par l'aqueduc qui traversait la vallée du Gardon sur le célèbre pont du Gard, détérioré par les Vandales. Le pont du Gard est représenté par les figures 4 et 3 de la planche 7.

Jusqu'à ces derniers temps, Nîmes ne disposait plus que des eaux de la fontaine de Nemausa, dont le volume descendait en été à 800 mètres cubes par jour pour une population de 60,000 habitants. Les souffrances étaient grandes et depuis longtemps on cherchait un remède.

Ancien aqueduc romain. — En remontant de Nîmes au pont du Gard, cet aqueduc avait 33,426 mètres avec une pente moyenne de $0^m,18$ par kilomètre, pente variant entre $0^m,07$ et $0^m,45$.

Le profil type paraît avoir été fixé à $1^m,20$ de largeur et $1^m,80$ de hauteur sous clef; l'enduit s'élevait à $1^m,15$ au-dessus du radier.

L'aqueduc était généralement enfoui à une profondeur quelquefois considérable. Il aboutissait au pont du Gard, formé de trois étages d'arcades superposées, ayant une hauteur totale de $48^m,77$ et une longueur au sommet de 269 mètres.

En amont du pont du Gard, l'aqueduc allait jusqu'aux sources d'Eure à 41 kilomètres de là, tantôt à ciel ouvert, tantôt enfoui dans le sol.

Il n'était plus possible de songer à dériver maintenant à nouveau les sources d'Eure, situées près de la ville d'Uzès; elles sont pour cette ville et ses environs un véritable trésor dont on ne saurait les dépouiller.

Projets divers. Dérivation et élévation des eaux du Gardon. — En 1780, on proposa la restauration de l'aqueduc romain, mais on n'osa point soutenir le projet.

Vers 1830, MM. Didion et Talabot, proposèrent d'exécuter un canal de dérivation du Gardon, latéral au chemin de fer d'Alais.

En 1839, M. l'inspecteur général des ponts et chaussées Perrier présenta un nouveau projet de dérivation des eaux du Gardon, par une rigole de 30,772 mètres de longueur dont 8,072 en deux souterrains ; la longueur d'un de ces souterrains atteignait 6,435 mètres. Ce projet échoua par l'opposition des usiniers et riverains du Gardon.

En 1844, un concours fut institué et divers projets furent examinés ; MM. Surell et Mourier barraient le Gardon au moulin Lafoux, y créaient des moteurs hydrauliques avec lesquels ils refoulaient une partie des eaux jusqu'au sommet d'un plateau, d'où elles se rendaient à Nîmes par un aqueduc de $0^m,80$ de large sur $0^m,90$ de hauteur.

M. Dombre proposait de se servir de l'ancien aqueduc Romain, entre le pont du Gard et Nîmes, en élevant les eaux au moyen d'une machine à vapeur.

Plusieurs autres personnes présentèrent des projets plus ou moins analogues aux précédents.

[1] *Les eaux de Nîmes, de Paris et de Londres,* par Aristide Dumont, ingénieur en chef des ponts et chaussées, 1 volume avec atlas, chez Dunod, éditeur.

En 1852, un nouveau concours fut institué, qui ne fit surgir que des projets incomplets et ne réussit pas mieux que le Concours de 1844.

En 1862, se forma la Compagnie des eaux du Midi, ayant pour but de créer une dérivation du Rhône, destinée à l'irrigation des terres et à l'alimentation des villes.

Cette Compagnie des eaux du Midi disparut, et c'est alors que M. Dumont se présenta demandant à établir des machines à vapeur à la Roche-de-Comps et à envoyer à Nîmes les eaux du Rhône, préalablement clarifiées par un filtrage naturel.

Description sommaire du projet exécuté. — « Le projet consiste essentiellement, dit le rapport de MM. les ingénieurs Salva et Lenthéric, dans l'établissement de machines à vapeur à la Roche-de-Comps sur la rive droite du Rhône, un peu en aval de l'embouchure du Gardon.

Ces machines sont destinées à faire mouvoir des pompes qui puiseront l'eau du Rhône, dans une galerie de filtration de 500 mètres de développement, de 10^{m},20 de largeur dans œuvre et parallèle à la rive du Rhône. Les eaux seront refoulées sur une longueur de 9,661 mètres, jusqu'à la métairie Pagès, à la cote de 63^{m},12 au-dessus du niveau de la mer.

En ce point, le tuyau de refoulement les déversera dans l'aqueduc voûté, commencé par la Compagnie des eaux du Midi, lequel sera achevé et mis en parfait état, entre la métairie Pagès et le mas Louis (extrémité de l'enclos Gasquet au valat Riquet) sur une longueur de 14,025 mètres.

Cet aqueduc ayant une section considérable (3^{m},20 de largeur sur 2 mètres de hauteur sous clef) et ayant en outre l'avantage d'être, sur la presque totalité de son parcours, recouvert d'une couche de terre et de déblais provenant des fouilles, sera utilisé comme réservoir.

A son extrémité, les eaux dégorgeront dans une conduite qui traversera, en siphon renversé, la route nationale n° 87 de Lyon à Béziers, entrera dans la ville par l'ancien chemin d'Avignon, et se prolongera jusqu'à l'Esplanade sur une longueur de 2,300 mètres environ, en passant par la rue Notre-Dame et la place de la Couronne.

Cette conduite maîtresse, alimentée par l'aqueduc-réservoir, se rattachera à une conduite annulaire faisant le tour des boulevards, et qui formera l'artère principale de la distribution intérieure, dont les détails importent peu et n'offrent d'ailleurs rien de particulier.

Les dispositions principales du projet sont donc :

1° Une galerie de filtration de 500 mètres de développement à établir dans les bancs de gravier du Rhône, en aval de la Roche de Comps ;

2° L'établissement de machines à vapeur et de pompes élévatoires ;

3° Une conduite de refoulement de 9,661 mètres, amenant les eaux à la métairie Pagès, dans l'aqueduc-réservoir en partie exécuté par la Compagnie des eaux du Midi ;

4° L'achèvement des travaux de cet aqueduc-réservoir, sur une longueur de 14,025 mètres.

5° La pose d'une conduite en siphon renversé sur 2,300 mètres, amenant les eaux à l'Esplanade.

6° La canalisation intérieure de la ville comprenant : bornes-fontaines, bouches sous trottoirs, etc.

La galerie de filtration, le diamètre des conduites, la force des machines sont calculés de manière à pouvoir élever 40,000 mètres cubes par jour d'eau fil-

trée, et le montant total des travaux doit s'élever au chiffre de 3 millions de francs.

La longueur du tracé est de..	25,986 mètres.
ainsi décomposée :	
De l'usine hydraulique de Comps à la métairie Pagès, conduite de refoulement.	9,661 —
De la métairie Pagès au mas Louis, aqueduc-réservoir.	14,025 —
Du mas Louis à l'Esplanade..	2,300 —
Total.	25,986 —

Justification de cette solution. — Clarification des eaux du Rhône au moyen de la galerie de filtration. — La distance qui sépare la roche de Comps de Nîmes est, en ligne droite (à vol d'oiseau) de 20,000 mètres environ. La longueur du tracé, en refoulant les eaux jusqu'à la métairie Pagès, et en utilisant, à partir de ce point, l'aqueduc-réservoir en partie exécuté, n'est que de 25,986 mètres.

Il est difficile de trouver un parcours plus direct, et l'allongement, d'ailleurs peu considérable, de 5 à 6 kilomètres, se justifie par la convenance d'utiliser, sur la plus grande longueur possible, l'aqueduc-réservoir commencé par la Compagnie des eaux du Midi, et de suivre, pour atteindre cet aqueduc, la route nationale n° 86 et le chemin vicinal de grande communication de Meynes à Montfrin, sans qu'il soit besoin, pour la pose des conduites sous le sol de ces deux routes, de faire aucune acquisition ni expropriation de terrains. »

Machines employées. — La galerie filtrante a été décrite à la page 88; nous donnerons seulement quelques renseignements sur les machines.

On avait projeté d'abord des machines de Cornouailles, analogues à celles de Lyon : capables d'élever chacune 1,200 mètres cubes d'eau par heure à une hauteur de $66^m,50$.

Les deux machines prévues devaient être installées par le Creusot moyennant une somme de 835,000 francs, et le Creusot garantissait que la consommation en charbon ne dépasserait pas $1^k,70$ par cheval et par heure.

On chercha un système plus économique qui fut adopté : il consiste en trois machines à action directe, dans lesquelles le diamètre du piston à vapeur est de $1^m,47$ et le diamètre du piston des pompes à double effet est de $0^m,62$; la course commune des pistons est de $1^m,30$. Le nombre de tours de ces machines était fixé à 12 par minute.

Les trois machines posées devaient coûter 365,000 francs.

Ce système a été adopté comme le moins coûteux et le plus maniable et se prêtant le mieux aux exigences d'une exploitation progressive.

La conduite de refoulement de 9,661 mètres de long est en fonte, avec un diamètre intérieur de $0^m,80$. Elle est soumise à sa base à une pression de près de 7 atmosphères.

Conduite en ciment. — Une partie de la conduite d'alimentation sur 9 kilomètres, à partir du réservoir Pagès, est en ciment : elle présente aussi un diamètre intérieur de $0^m,80$ et une épaisseur variable suivant les pressions supportées.

Les conduites en ciment d'un fort diamètre ne présentent sur la fonte d'avantages sérieux, d'économie et de sécurité que lorsqu'on les emploie sous de

faibles charges ne dépassant pas 10 à 15 mètres. Aussi, ne les a-t-on employées à Nîmes que sur une section où la pression ne dépassait pas 12 mètres.

L'épaisseur E de la conduite en ciment, était calculée par la formule :

$$E = \frac{D.H}{30}$$

dans laquelle D est le diamètre et H la pression en mètres.

Le béton de ciment était composé par mètre cube de

500 kilogrammes de ciment de la porte de France à Grenoble.
500 litres de sable.
500 litres de gravier.

Les tuyaux de 0,80 de diamètre, mis en place, étaient payés 50 francs le mètre courant, tout compris.

Prix de revient du mètre cube. — Le prix de revient du mètre cube d'eau y compris intérêt, personnel, entretien et amortissement des machines sera de $0^{f},05\ 1/4$.

La fourniture journalière d'un mètre cube coûtera donc à la ville $20^{f},95$ par an.

Le prix prévu par les actes de concession est de $0^{f},40$ le mètre cube pour les usages domestiques et $0^{f},20$ pour les usages industriels.

5° EAUX D'ORLÉANS.

En face d'Orléans, sur la rive gauche de la Loire, entre ce fleuve et le Loiret, s'étend une plaine qui recouvre une nappe d'eau puissante en communication avec le fleuve ; c'est cette nappe qui alimente les sources du Loiret.

Elle donne une eau naturellement filtrée par son voyage souterrain. Cette eau a les qualités d'une eau potable, et ne renferme que $0^{gr},105$ de matières solides par litre.

Sa température est peu variable et se maintient entre 10° et 15°.

La prise d'eau se compose d'une série de puits verticaux, mis en communication par des galeries, afin de développer la surface de filtration. Pendant les crues de la Loire, les eaux prennent néanmoins une légère teinte louche.

L'aspiration se fait par un tuyau de $0^{m},50$ qui se bifurque en deux branches alimentant chacune une machine.

Chaque pompe de refoulement envoie les eaux dans une conduite de $0^{m},35$ de diamètre, et les deux conduites se réunissent au delà des réservoirs à air comprimé en une seule de même diamètre qui donne un débit de 84 litres par seconde ou 300 mètres cubes à l'heure.

La conduite de refoulement a 7 kilomètres de long, et la perte de charge produite par le parcours est d'environ 6 mètres pour une ascension de $34^{m},35$.

Cette conduite a un plan et un profil en long accidentés ; à chaque point bas se trouve un robinet de décharge et à chaque sommet une ventouse ou robinet à air.

La quantité d'eau élevée par jour est de 4,000 mètres, ce qui porte la consommation moyenne par habitant à 90 litres, la population totale étant de 45,000 âmes.

Le réservoir de distribution, bien que placé dans la partie haute de la ville n'eût pu alimenter la gare du chemin de fer et le premier étage des maisons voisines si on l'avait enfoui dans le sol ou même placé au niveau du sol ; on a dû en élever le radier à 7^{m},50 au-dessus du sol ; il peut contenir une hauteur d'eau de 5 mètres et un cube total de 2,300 mètres (figures 8 et 9, planche 14).

La dépense totale s'est élevée à 1 million de francs ; le prix de vente du mètre cube d'eau est fixé à 0 fr. 20 cent. pour les particuliers et à 0 fr. 10 pour les industriels.

6° DISTRIBUTION D'EAU DE CRÉTEIL.

La distribution d'eau de Créteil, qui n'a coûté que la modeste somme de 69,000 francs, peut être prise, dit M. Dumont, pour type des distributions d'eau à bon marché.

L'eau a été puisée à la Marne, à raison de 150 mètres cubes par jour, soit 136 litres par tête pour une population de 1,100 habitants.

La hauteur d'élévation est de 32^{m},30 au-dessus de l'étiage de la rivière. Le moteur est une machine à vapeur verticale de la force de six chevaux actionnant une pompe à double effet à piston plongeur.

La machine fait 15 tours à la minute ; le diamètre du piston est de 0^{m},28 et sa course 0^{m},60. La pompe donne 30 coups à la minute, son diamètre est de 0^{m},24 et la course du piston est de 0^{m},60 comme pour la machine motrice.

La conduite de refoulement a 0^{m},160 de diamètre.

Elle déverse les eaux dans trois réservoirs cylindriques en tôle espacés de 0^{m},50 et communiquant entre eux. Chaque réservoir a 4 mètres de diamètre intérieur et 4 mètres de hauteur : il contient 50 mètres cubes d'eau ; il est installé sur un plancher en chêne qui repose sur des murs en moellons de 8 mètres de hauteur et de 0^{m},40 d'épaisseur, reliés entre eux par des tirants en fer. Chaque réservoir a coûté 5,900 francs.

Des réservoirs partent les conduites de distribution. Les réservoirs métalliques aériens ont évidemment un grave inconvénient : ils sont trop sensibles à la température extérieure, et il conviendrait de les envelopper d'une épaisse chemise de matières peu conductrices de la chaleur.

D'autre part, l'emploi d'un moteur unique est dangereux ; il peut arriver des avaries qui entraînent plusieurs jours de chômage. Néanmoins, lorsque l'économie est la condition première d'établissement, il est clair qu'il vaut mieux n'installer d'abord qu'un moteur unique, se réservant d'en installer un second dans l'avenir. Mais cette solution doit être adoptée en connaissance de cause et l'ingénieur, chargé du projet, doit avoir soin d'en signaler tous les inconvénients aux populations intéressées.

7° DISTRIBUTION D'EAU DE LILLE [1].

Les eaux souterraines, dit M. Masquelez, ont desservi jusqu'à présent les usages domestiques de la ville de Lille. Dans certains quartiers, l'eau a un goût très-désagréable de fer ou de soufre. Ailleurs, elle est excessivement chargée de sels calcaires et contient des sulfates en proportion nuisible. Enfin, presque partout, on constate une grave altération, par suite d'infiltrations diverses dans les terrains très-perméables en contact, et on sait que, dans ce cas, la présence des matières organiques offre les plus grands dangers pour la santé.

Pour se procurer en eau potable tout le volume nécessaire aux usages industriels et domestiques, la ville de Lille avait à sa disposition :

Les quatre sources de Bénifontaine, à l'amont du flot de Wingles, d'un débit journalier minimum de..	10,000	mètres cubes.
Les sources de Seclin, perdues au fond du canal de Seclin et faciles à reconquérir.	10,700	—
Les sources de Billaut et de Guermanez.	5,000	—
La source de la Cressonnière, territoire d'Emmerin.	1,650	—
Eau drainée par l'aqueduc de captation de ces diverses sources..	12,650	—
Total des ressources probables au minimum.. . .	40,000	—

Pour une population de 155,000 âmes, c'est une part minima de 176 litres par habitant et par jour.

Le mélange des eaux amenées à Lille présente une parfaite limpidité et un très-bon goût ; le degré hydrotimétrique est satisfaisant ; ce mélange réalise donc tous les caractères d'une eau potable.

Le produit de chaque source est recueilli dans un aqueduc secondaire qui vient s'embrancher sur l'aqueduc collecteur, et celui-ci emmagasine toutes les eaux dans le réservoir inférieur, construit à Emmerin, au pied du long versant méridional du monticule de l'Arbrisseau.

Dans ce réservoir, les eaux sont reprises par des machines et élevées au sommet du monticule dans un réservoir placé à l'altitude de 50 mètres, c'est-à-dire dominant d'environ 30 mètres la ville de Lille et sa banlieue.

L'aqueduc collecteur des sources a son radier presque partout à $1^m,90$ au-dessous du niveau d'étiage des puits voisins du tracé, de sorte qu'il exerce par ce radier un drainage énergique du sol environnant ; il est du reste fondé dans un banc de craie fendillée permettant la communication avec la nappe des bas fonds de la vallée.

L'aqueduc collecteur traverse en siphon le flot de Wingles, la Deûle et le canal de Seclin ; les siphons sont établis avec conduites en fonte du diamètre de $0^m,60$ pourvues des joints élastiques Delperdange.

L'aqueduc collecteur, entre les sources de Bénifontaine et le réservoir inférieur a une longueur de 16,958 mètres avec une déclivité uniforme de $0^m,0002$.

[1] *Établissement de la distribution d'eau de Lille*, rapports et pièces à l'appui par M. Masquelez, ingénieur en chef des ponts et chaussées, directeur des travaux municipaux, un volume avec atlas, chez Dunod, éditeur.

Partout il est recouvert d'une épaisseur de terre d'au moins 1 mètre : quelques petites chutes sont ménagées, elles contribueront à l'aérage de l'eau et permettront d'installer des appareils de jaugeage. Aux prises d'eau des sources, aux extrémités des siphons sont établis des pavillons qui entretiendront dans le collecteur un courant d'air continuel; le collecteur présente du reste de grandes dimensions, précisément pour permettre la circulation de l'air, et aussi pour faciliter la circulation des ouvriers lors des réparations.

Outre les pavillons principaux, il existe des regards tous les 200 mètres.

La figure 6 de la planche 14 représente la section transversale de l'aqueduc collecteur dans la partie à radier libre qui repose sur la craie fendillée.

L'altitude de départ du collecteur est de.	$20^m,31$
— d'arrivée.	$16^m,20$
D'où un abaissement total de. . . .	$4^m,11$

Sur lequel les chutes absorbent $0^m,451$.

Le point de départ du collecteur est à $1^m,70$ au-dessous de la cote d'émergence moyenne des sources de Bénifontaine; cet abaissement a pour objet d'augmenter le débit des sources et d'en tirer le plus grand parti possible. A droite et à gauche, le collecteur principal reçoit les aqueducs secondaires qui lui amènent le produit des diverses sources énumérées plus haut.

Le réservoir inférieur est construit dans toute la hauteur de la craie aquifère ; on a pu réduire à $0^m,70$ l'épaisseur des murs de pourtour et à $0^m,28$ celle du radier. D'où une grande économie, et la possibilité de recueillir par des barbacanes les eaux de suintement qui s'écoulent en abondance de la craie aquifère.

Le réservoir inférieur est calculé de manière à emmagasiner le produit des sources pendant vingt-quatre heures et il en est de même du réservoir supérieur ; c'est donc une réserve totale de deux journées d'alimentation.

Le réservoir est divisé en deux compartiments que l'on peut réunir ou séparer à volonté, de manière à épuiser complétement l'un d'eux pour y procéder aux réparations nécessaires.

La hauteur d'eau ne doit pas dépasser $4^m,10$; en service normal, elle se maintient à $3^m,50$

Le réservoir supérieur a son radier à la cote 45 mètres et la hauteur d'eau peut s'y élever à 5 mètres ; le niveau moyen du sol de la ville étant de 22 mètres, la pression moyenne atteindra $25^m,50$ et sera plus que suffisante pour maintenir dans tout le réseau des conduites une pression convenable.

A l'autre extrémité de l'artère principale sera établi ultérieurement le réservoir de Saint-Maurice destiné à compléter le système.

Entre le réservoir inférieur et le réservoir supérieur, il existe deux conduites de refoulement de $0^m,60$ de diamétre, capables de livrer passage chacune à 22,500 mètres cubes par vingt-quatre heures.

Actuellement, les deux conduites réunies ne donnent passage par jour qu'à 11,250 mètres cubes.

La hauteur maxima de l'élévation est de.	$34^m,25$
La perte de charge due à l'écoulement du volume précité est de.	$0^m,60$
Résistance totale à vaincre.	$34^m,85$

La quantité à élever par seconde étant de 174 litres, entraine une dépense de travail mesurée par 81 chevaux vapeur.

On a adopté une force de 85 chevaux effectifs.

Le moteur est une machine horizontale de 85 chevaux effectifs, à haute pression, à détente variable et à condensation, munie d'un régulateur, ralentie à la vitesse de 16 tours par minute.

Une machine semblable est établie comme réserve pour suppléer la précédente en cas de chômage et la renforcer au besoin.

La machine actionne une pompe horizontale à double effet, dont tous les clapets, logés dans des chapelles facilement accessibles, offrent au passage de l'eau des sections telles, que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas $1^m,50$ par seconde.

Le total des dépenses effectuées jusqu'ici est de 2,870,000 francs.

Le prix du mètre cube d'eau distribué revient à 0 fr. 044.

On trouvera dans l'ouvrage de M. l'ingénieur en chef Masquelez les devis et cahier des charges ainsi que l'analyse et le bordereau des prix qui ont servi de base à l'entreprise ; ces documents seront utilement consultés par les ingénieurs chargés de projeter une distribution d'eau.

DES RÉSERVOIRS D'AIR COMPRIMÉ

Les réservoirs d'air comprimé ont pour but de régulariser le mouvement de l'eau dans la conduite ascensionnelle, d'emmagasiner à certains moments l'excès de travail fourni par le moteur et de combler à d'autres moments le déficit dans le travail nécessaire au maintien du mouvement uniforme de l'eau.

La masse d'eau à mettre en mouvement par le moteur se réduit à celle qui est comprise entre ce moteur et le réservoir d'air comprimé ; la pompe peut donc obéir à toutes les variations de vitesse qui lui sont communiquées par le moteur, sans qu'il en résulte des chocs préjudiciables; ces chocs seraient perpétuels si la pompe devait mettre en mouvement une masse d'eau considérable qui constituerait un volant dangereux.

La régularité du mouvement ascensionnel de l'eau sera d'autant plus près d'être réalisée que les variations de pression de l'air comprimé dans le réservoir auront moins d'amplitude.

Il importe donc de déterminer en conséquence le volume du réservoir d'air comprimé : si V est le volume d'eau envoyé par la pompe à chaque coup de piston, comme la vitesse du piston va de zéro à un certain maximum, la régularité du mouvement ascensionnel suppose que le réservoir à air emmagasine la moitié du volume V.

Soit V_1 le volume maximum de l'air comprimé, V_2 son volume minimum, p_1 et p_2 les pressions correspondantes. On aura :

$$V_1 - V_2 = \frac{1}{2} V$$

et, d'après la loi de Mariotte,

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

La variation des pressions est $(p_2 - p_1)$ et la pression moyenne $\frac{1}{2}(p_1 + p_2)$; la régularité du mouvement qu'on obtiendra dépendra donc de la valeur du coeffi-

cient $\left(\frac{1}{n}\right)$ qui exprime le rapport de la variation des pressions à la pression moyenne.

$$p_2-p_1=\frac{1}{n}\frac{p_1+p_2}{2}$$

La résolution de ces trois équations conduit à la relation :

$$V_1=\frac{1}{4}V(2n+1)$$

qui déterminera V_1 lorsqu'on se sera donné la valeur de (n). Si l'on fait, par exemple ($n=4$), V_1 devra être égal à $\frac{9}{4}$ V et les dimensions du réservoir se trouveront par le fait déterminées.

Comme nous l'avons déjà dit, l'usage du réservoir à air comprimé a fait disparaître le vieux système des châteaux d'eau, dont l'effet était de réduire au strict minimum la masse de la colonne ascensionnelle que le moteur devait mettre en mouvement à chaque coup de piston.

« Les ingénieurs américains, dit M. Malézieux, n'accordent qu'une confiance limitée à ce mode de régularisation du jeu des pompes ; ils doutent de la possibilité d'alimenter sûrement les réservoirs d'air. Aussi emploient-ils généralement, par surcroît de précaution, un tuyau métallique implanté à l'origine de la conduite de refoulement : ce tuyau étant ouvert par le haut, l'eau peut s'y élever et y osciller librement. Ces tuyaux verticaux, qui portent le nom de stand-pipes, sont protégés contre la gelée par une chemise en maçonnerie. »

En France, il ne semble pas jusqu'à présent qu'on doive mettre en doute l'efficacité des réservoirs à air comprimé et qu'il y ait lieu de recourir à d'autres systèmes.

CHAPITRE VI

ÉLÉMENTS D'UNE DISTRIBUTION D'EAU

Parmi les éléments d'une distribution d'eau, nous étudierons successivement :

1° Les conduites,
2° Les appareils accessoires des conduites, robinets, ventouses,
3° Les appareils de distribution publique,
4° Les appareils de distribution privée,
5° Les réservoirs.

1° DES CONDUITES

On met en œuvre divers genres de conduites qui sont :

Les conduites en bois,
— en ciment ou poterie,
— en fonte,
— en tôle enduite de bitume.
— en plomb.

I. **Conduites en bois.** — L'un des systèmes de canalisation les plus anciens et qu'on emploie encore aujourd'hui çà et là, disent MM. Debizc et Mérijot dans leur *Chimie technologique*, est formé par des tuyaux en bois. On prend des branches entières brutes, à travers lesquelles on perce, à la tarière, un trou de largeur convenable. Le choix de l'espèce de bois exerce une grande influence. Le prix peu élevé des sapins, leur régularité, la facilité de leur creusement les font souvent employer. On choisit, d'ailleurs, dans cette essence, autant que possible, le pin, que l'expérience a démontré comme étant le plus durable et le plus convenable. Pour éviter que le bois ne se fendille en se desséchant, et pour lui enlever ses principes solubles, on a généralement soin de maintenir les tuyaux un temps suffisant dans l'eau, avant de le mettre en place. Les assemblages se font, soit en emboîtant l'un dans l'autre les tuyaux convenablement taillés à leurs extrémités, soit simplement en reliant les deux bouts voisins par un anneau en fer, figure 33, muni de bords aigus, qui s'enfoncent dans chacune des parties. Les canalisations en bois, bien que très-économiques d'instal-

lation, se conservent très-mal et exigent un entretien coûteux; les anneaux d'assemblage se rongent par la rouille, le bois lui-même se modifie en peu d'années et passe à l'état de masse pourrie, absolument sans résistance. On a proposé d'imprégner le bois de goudron; mais, outre que cette préparation est coûteuse, elle donne souvent aux eaux uu goût qui persiste très-longtemps. Aussi, ces divers motifs ont-ils fait renoncer depuis longtemps au bois dans les

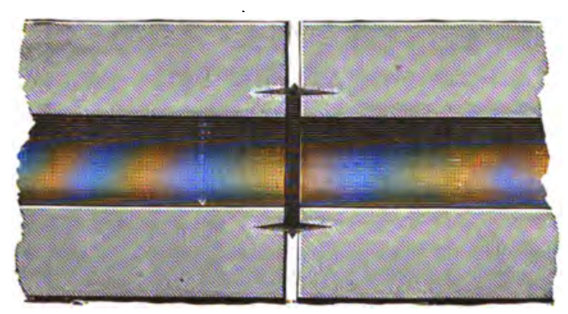


Fig. 33.

diverses installations, et on ne le rencontre plus que rarement et dans des cas spéciaux.

II. **Conduites en ciment ou en poterie.** — Il est facile aujourd'hui d'établir partout, à des prix modérés, des tuyaux en béton de ciment. Ces tuyaux conviennent plutôt à des aqueducs, à des conduites sans pression qu'à des conduites forcées.

On peut les fabriquer sur place, et par portions successives, comme nous l'avons vu faire pour les distributions d'eau d'Avallon et de Saint-Étienne; nous ne reviendrons pas sur les détails de fabrication suffisamment expliqués plus haut.

Beaucoup de fabriques de tuyaux de ciment se sont établies; en général, leurs produits sont chers. Lorsqu'on a une certaine longueur d'aqueduc à exécuter il y a avantage à faire la dépense des moules et à exécuter les tuyaux sur place.

A Nîmes, la partie supérieure de la conduite d'adduction, soumise à de faibles pressions, a été exécutée avec des tuyaux en béton de ciment, sur un diamètre intérieur de $0^{m},80$.

Les conduites en ciment d'un fort diamètre, dit M. Dumont, ne présentent sur la fonte d'avantages sérieux d'économie et de sécurité que lorsqu'on les emploie sous des charges ne dépassant pas 10 à 15 mètres.

Dans l'exécution des canalisations en béton de ciment, il faut se baser pour l'estimation de la dépense sur le prix minimum de 60 francs pour le mètre cube de béton employé, et il faut augmenter d'un sixième le volume des tuyaux, afin de tenir compte des bourrelets et des joints.

Voici, d'après M. Dumont, deux tableaux donnant l'épaisseur et le prix des tuyaux en ciment :

DIAMÈTRE DES TUYAUX	CHARGE SUR LES TUYAUX								
	5m			10m			15m		
	ÉPAISSEUR	CUBE	PRIX	ÉPAISSEUR	CUBE	PRIX	ÉPAISSEUR	CUBE	PRIX
mètre	mètre	m. c.	francs	mètre	m. c.	francs	mètre	m. c.	francs
0,60	0,10	0,25	15	0,20	0,57	34	0,30	0,98	60
0,65	0,11	0,34	20	0,22	0,69	41	0,33	1,05	69
0,70	0,12	0,36	22	0,25	0,78	47	0,35	1,35	81
0,75	0,13	0,42	25	0,25	0,92	55	0,37	1,52	91
0,80	0,14	0,47	28	0,27	1,05	63	0,40	1,75	105
0,85	0,15	0,55	33	0,29	1,20	72	0,43	2,00	120
0,90	0,15	0,58	35	0,30	1,30	78	0,45	2,20	132

Les tuyaux du diamètre $0^m,30$ ne peuvent se mouler à moins de $0^m,08$ d'épaisseur; ils coûtent alors 9 francs et peuvent résister à une charge de 7 mètres. Le prix augmente rapidement avec la charge.

De même, les tuyaux de $0^m,25$ ne peuvent se mouler avec une épaisseur inférieure à $0^m,08$, ils coûtent alors 8 francs et peuvent résister à une charge de 8 mètres d'eau.

Les tuyaux de $0^m,20$, $0^m,15$, $0^m,10$ de diamètre intérieur ne peuvent se mouler avec une épaisseur inférieure à $0^m,07$, $0^m,07$, $0^m,06$; ils coûtent alors 7 francs, 5 francs 50 et 4 francs, et peuvent résister à des charges de 10 mètres, 10 et 15 mètres d'eau.

« Les tuyaux en ciment, dit M. l'ingénieur Huet dans son rapport sur l'Exposition de 1867, sont bons et avantageux, lorsqu'il y a peu de raccords, de sinuosités, de coudes dans la conduite, de variations brusques de pression, c'est-à-dire qu'ils peuvent être employés avec sécurité plutôt pour conduire les eaux que pour les distribuer.

Les tuyaux en ciment de Grenoble, employés dans la dérivation des eaux de Nice, fonctionnent parfaitement sous une pression de trois atmosphères. Nous en dirons autant des tuyaux en terre cuite émaillée, et particulièrement des tuyaux Zeller d'Ollwiller (Haut-Rhin) avec joints en ciment. Ces derniers sont particulièrement remarquables par leur belle exécution; ils présentent sur les tuyaux en fonte une économie de 20 pour 100; ils ont sur eux, et surtout sur les tuyaux en tôle et bitume, l'avantage d'une durée indéfinie; ils ne subissent à l'intérieur aucune altération et ne favorisent pas les incrustations, les obstruc-

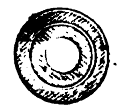
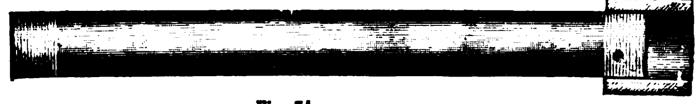



Fig. 54.

tions; leur assemblage se fait à l'aide de manchons, c'est-à-dire qu'ils sont uniformément droits, par conséquent d'une exécution facile et sûre. Ils ont été adoptés dans la canalisation d'un grand nombre de villes (Lunéville, Mulhouse, Soissons).

Les tuyaux anglais, qui s'assemblent à emboîtement, ne présentent pas la même finesse, la même perfection d'exécution; mais, rendus en France, ils ne reviennent encore qu'à moitié prix. Toutefois, leur véritable place est dans le drainage des habitations. »

L'assemblage des tuyaux, en ciment ou en terre cuite, se fait, soit par assemblage d'un bout mâle et d'un bout femelle, soit, le plus souvent, par le moyen d'un manchon couvre-joint, figure 34. Pour assurer l'étanchéité, un mastic est interposé; il faut éviter les mastics gras qui attirent les rats; et le mieux est de recourir à un mortier fin de ciment. Lorsque les tuyaux ont été émaillés au sel, l'émail est répandu sur toute la surface, interne et externe, et, pour obtenir l'adhérence du ciment, il est nécessaire de strier les bouts de tuyaux recouverts par les manchons.

Les tuyaux en poteries ne s'obtiennent guère sous des longueurs supérieures à 1m50; ils ont donc le grave inconvénient de la multiplicité des joints; ils sont très-résistants aux pressions, mais manquent absolument de flexibilité, de sorte que les porte-à-faux leur sont très-préjudiciables.

On a fait des conduites en verre qui sont très-résistantes, mais très-fragiles et reviennent à un prix fort élevé.

III. **Conduites en fonte.** — Les conduites en fonte sont de beaucoup les meilleures; elles se fondent sur des longueurs de plusieurs mètres, présentent, par conséquent, peu de joints; elles sont très-résistantes, et s'obtiennent facilement sous une forme parfaitement régulière; tous les raccords, tous les coudes, sont fondus à l'avance et s'assemblent d'une manière pour ainsi dire mathématique, ce qu'on ne saurait obtenir avec les autres systèmes; les joints sont faciles à garnir et à rendre étanches.

Toutes les fois donc que l'économie de premier établissement ne sera pas formellement imposée, on devra donner la préférence aux tuyaux en fonte, du moins pour les conduites de grand diamètre, pour celles qui sont soumises à de fortes pressions et à des chocs, telles que les conduites ascensionnelles, pour celles qui sont contournées et changent fréquemment de direction.

Les divers systèmes de tuyaux en fonte ne varient que par le mode d'assemblage.

La longueur des tuyaux en fonte varie de 2m,50 à 3 et 4 mètres, non compris le joint des tuyaux à emboîtement; celui-ci forme une saillie de 0m,10 en sus de laquelle il faut compter un intervalle de 0m,005 pour la dilatation. Les tuyaux doivent être coulés verticalement, pour que leur épaisseur soit uniforme et réduite au strict nécessaire.

Les trois systèmes d'assemblage les plus répandus sont : 1° l'assemblage à emboîtement; 2° l'assemblage à brides; 3° l'assemblage à bagues. En voici la description sommaire :

1° **Assemblage à emboîtement.** — L'assemblage à emboîtement est représenté par la figure 35, le joint non garni, et la figure 36 présente, en demi-



Fig. 35.

coupe longitudinale et demi-élévation, l'emboîtement d'un tuyau en fonte de 0m,10 de diamètre.

Pour former cet assemblage, après avoir placé le petit bout d'un tuyau dans l'emboîtement de l'autre, on remplit l'intervalle des deux parois avec de la corde goudronnée, qu'on fait pénétrer avec un ciseau à mater, jusqu'à ce qu'elle soit

arrêtée par le filet qui termine le tuyau intérieur. Quand elle est fortement comprimée, et qu'il ne reste plus à remplir qu'un intervalle de 0m,04 de longueur jusqu'à l'extrémité du joint, on garnit tout le pourtour de ce joint avec

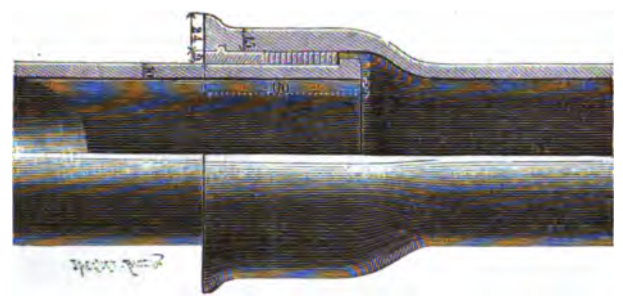


Fig. 36.

un boudin d'argile plastique, et l'on réserve dans cette argile, à la partie supérieure, une sorte de godet pour y couler du plomb fondu, de manière à remplir tout l'espace resté libre entre les deux parois des tuyaux. Ce plomb doit être à une température assez élevée pour qu'il ne se refroidisse pas au contact de la fonte, au point de se solidifier avant d'avoir rempli tout le vide du joint. On reconnaît que cette température est suffisante, quand une feuille de papier plongée dans le métal en fusion s'y enflamme. Le plomb, ainsi coulé, forme, entre la corde et le bourrelet de glaise, une bague continue qui ne peut plus être chassée par la pression de l'eau; car on a ménagé à l'intérieur de l'emboîtement une rainure annulaire, qui maintient le métal en place, même après que, s'étant refroidi, il s'est détaché de la surface de l'emboîtement pour serrer la surface du tuyau intérieur. Quand le refroidissement a eu lieu, le bourrelet de glaise est

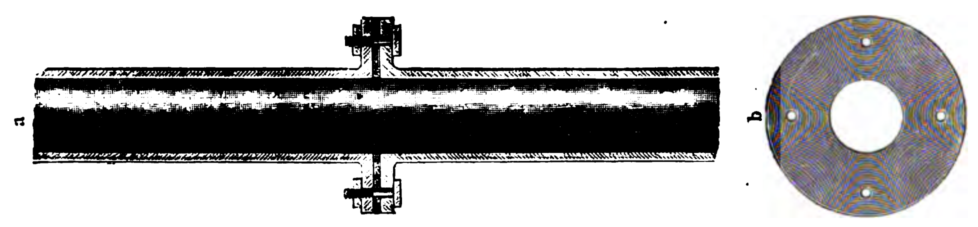


Fig. 37.

enlevé, le plomb est comprimé, avec le ciseau à mater, dans le pourtour du joint, et celui-ci est par là rendu complétement étanche.

2° **Assemblage à brides.** — Cet assemblage, figure 37, le seul employé autrefois, ne sert plus que pour la pose des robinets et appareils spéciaux. Il permet de changer ceux-ci, sans que l'on soit obligé de couper les tuyaux. La bride est une saillie annulaire, réunie au corps du tuyau par un congé et une surépaisseur de quelques centimètres de longueur. Cette surépaisseur est nécessaire pour tenir compte des soufflures, qui se produisent souvent dans les coudes; il faut les compenser par un surcroît de matières.

La face des brides est légèrement évasée et présente un fruit de 0m,004 à 0m,005, pour une longueur de 0m,07 à 0m,085. L'intervalle des brides est rempli par une rondelle en plomb, dont la section est également évasée; cette disposition des brides et de la rondelle a pour objet, lorsqu'on serre les boulons qui

complètent l'assemblage, d'empêcher le plomb comprimé de former à l intérieur du tuyau un bourrelet saillant, gênant l'écoulement des eaux. On achève le joint en matant soigneusement la rondelle de plomb.

3° **Assemblage à bagues.** — La figure 38 représente un assemblage à bagues pour tuyau de 0m,10 de diamètre; il consiste dans une bague de 0m,08 à 0m,10 de largeur, que l'on passe sur le joint; l'intervalle est rempli en plomb coulé et maté. Cette disposition n'est pas applicable aux tuyaux posés en terre; les tassements auxquels ils sont exposés donneraient lieu à des fuites, mais elle est couramment employée dans les égouts et partout où les tuyaux se trouvent maintenus dans une position parfaitement fixe. On emploie pour cela, soit des

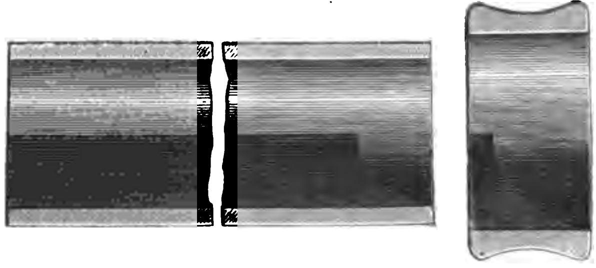


Fig. 38.

consoles scellées dans les murs, soit, pour les conduites de 0m,80 à 1m,10 de diamètre, des colonnettes en fonte. L'assemblage à bague permet de conserver aux tuyaux une forme cylindrique sur toute leur étendue et, par cela même, d'utiliser tous les bouts de tuyaux, sans manchons ni raccords spéciaux. De plus, la bague étant légèrement conique, il suffit, pour la desceller, de la frapper avec un marteau sur son pourtour. Le démontage se fait ainsi avec la plus grande facilité, sans couper le tuyau et sans feu pour fondre le plomb, avantage précieux sur les tuyaux à emboîtement.

Mamelon de prise d'eau. — Afin de faciliter l'exécution des travaux de prise d'eau à faire sur les conduites pour donner de l'eau dans les maisons particulières, on fait venir de fonte sur tous les tuyaux, près de l'emboîtement, un mamelon de 0m,08 de diamètre, dont la face extérieure est plane; ce mamelon épaissit en ce point la paroi du tuyau de 0m,005, et peut, quand il a été percé et taraudé, recevoir un robinet que l'on fixe en le vissant sur la conduite; un cuir interposé entre le collet adjacent au pas de vis et la face plane du mamelon rend le joint très-imperméable.

Les tuyaux de fonte sont préservés de l'oxydation au moyen d'un enduit de coaltar.

Tuyaux à joints forcés. — Les tuyaux à joints forcés, peu usités en France, le sont beaucoup plus en Angleterre. Les grandes usines de Glascow, merveilleusement outillées, fabriquent jusqu'à 30 tonnes, par jour, de tuyaux d'un modèle parfaitement régulier.

Chaque tuyau, figure 39, porte un bout mâle et un bout femelle; le bout mâle présente une surface légèrement conique, parfaitement tournée, et le bout femelle une surface conique égale, parfaitement alésée. Le contact de ces deux surfaces, pressées l'une contre l'autre par quelques légers coups de marteau, suffit pour assurer un joint parfaitement étanche.

Ce joint n'est pas coûteux et se fait en un instant; s'il se produit quelque fuite, elle est sans importance.

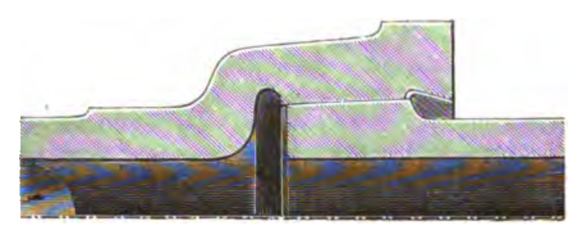


Fig. 39.

L'inconvénient est dans la rigidité du système, qui exige une pose des plus soignées.

Joint Doré. — Le joint sphérique Doré, qui est bien conçu et a donné de bons résultats, ne s'est sans doute pas propagé parce qu'il exige des modèles soignés et une fabrication minutieuse. — Le bout mâle se termine par un renflement sphérique convexe, et le bout femelle par un renflement sphérique concave; le coulage et le matage du plomb se font comme dans le joint à emboitement cylindrique, mais on peut se passer de la corde goudronnée et même se contenter du matage à froid. — Par la forme même de l'emboîtement, le plomb ne peut s'échapper et toute rainure annulaire est inutile.

Le joint sphérique permet en outre une flexibilité relative qu'on ne saurait obtenir avec l'emboîtement cylindrique.

Joints à caoutchouc. — Pour éviter les fuites quelquefois considérables qui se produisent toujours aux joints des tuyaux, on a eu l'idée de substituer au chanvre goudronné et au plomb une matière plus élastique, épousant mieux

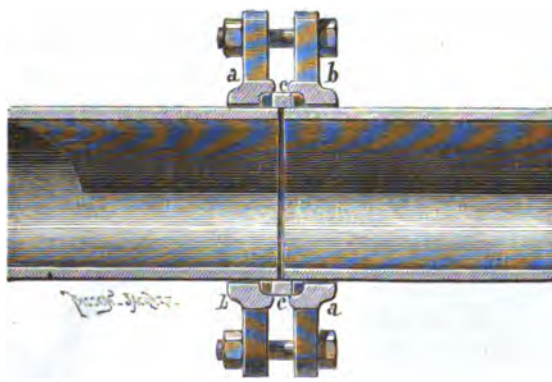


Fig. 40.

toutes les aspérités et se prêtant même à certaines déformations; nous voulons parler du caoutchouc.

Les joints Petit et Lavril sont les plus anciens; les seuls qui semblent restés dans la pratique sont le joint Marini et le joint Delperdange.

Le *joint Marini*, figure 40, se compose de deux brides mobiles *ab* s'engageant à frottement doux sur les conduites, de deux cordes circulaires en caoutchouc accolées à ces brides et d'une bague en fonte *cc* ou couvre-joint de 0m,03 de largeur. On engage sur chaque tuyau une bride avec son caoutchouc, on place le couvre-joint, puis on rapproche les brides et on opère le serrage des boulons;

le caoutchouc pénètre dans tous les interstices, et l'on obtient un joint tout à la fois étanche et flexible.

Le *joint Delperdange* est vivement recommandé par M. l'ingénieur en chef Masquelez, qui en a fait grand usage à Lille et à Valenciennes; ce joint a donné environ vingt fois moins de fuites que le joint au plomb. — Les fuites les plus sérieuses, dit-il dans son ouvrage sur la distribution d'eau de Lille, ont eu lieu à des joints à brides boulonnées et au plomb; « les petits accidents arrivés à des extrémités de conduites, momentanément interrompues pour aller en exécuter d'autres, s'expliquent parfaitement par des coups de bélier, qui ont disparu depuis que nous avons pu fermer tous les circuits, ainsi qu'on doit le faire dans tout réseau bien combiné, non-seulement pour équilibrer les pressions et faciliter l'alimentation des grands consommateurs, mais encore pour éviter les dépenses d'eau et d'appareils qu'il faudrait accepter, dans le cas du maintien d'un certain nombre de terminus, en vue d'empêcher l'eau d'y devenir insalubre à cause de sa stagnation. »

Des expériences précises ont constaté que:

« 1° Une conduite résistait à une pression de 16 atmosphères, sans manifester aucune fuite; 2° que des bagues en caoutchouc, employées depuis quatre ans sous une pression de 7 atmosphères, étaient parfaitement conservées; 3° qu'en recouvrant le joint d'un lut protecteur, on obtiendrait une grande garantie pour la conservation du caoutchouc et du collier en fer, dont la durée en bon état formait la seule inconnue; 4° que la célérité de la pose ne laissait rien à désirer, en raison de l'extrême perméabilité du joint; 5° que l'élasticité était très-avantageuse dans les sols peu résistants; 6° enfin, qu'on pourrait réaliser une économie suffisante pour faire face, en cas d'insuccès, au remploi des tuyaux avec des manchons fixés au plomb. »

L'altération du caoutchouc dans le sol semble être surtout le résultat de la qualité insuffisante du produit mis en œuvre; car on sait que les soupapes et pistons en caoutchouc font un excellent service dans les pompes d'épuisement.

Le lutage au brai de goudron du collier isole non-seulement le collier, mais encore la bague en caoutchouc, de l'humidité et des influences délétères qui peuvent tenir à la nature même du terrain.

L'avantage du joint Delperdange est de permettre un démontage facile; avec les emboîtements, il faut briser le premier tuyau qu'on enlève, et généralement

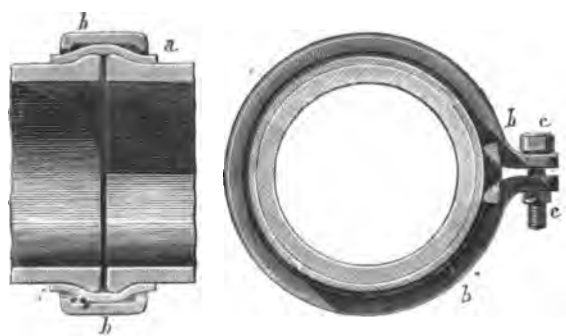


Fig. 41.

on les déforme; les tuyaux à joint Delperdange, lorsqu'ils sont devenus d'un trop faible diamètre, peuvent être démontés et reportés sur une autre artère de moindre importance.

La figure 41 représente le joint Delperdange ; les deux tuyaux voisins sont aboutés et présentent un renflement d'extrémité sur lequel s'applique et se moule la bague en caoutchouc *a*, *a* ; sur la bague en caoutchouc on pose le collier en fer *bb*, auquel on fait subir un serrage convenable au moyen de l'écrou *c*, *c*.

Les joints au caoutchouc sont donc excellents lorsque cette matière est bien préparée ; malheureusement, il est très-difficile d'avoir du caoutchouc vulcanisé parfaitement homogène : trop vulcanisé, le caoutchouc devient cassant ; vulcanisé d'une manière insuffisante, il se décompose peu à peu.

Résistance des tuyaux. — Nous avons donné à la page 14 de l'*Hydraulique* les formules qui permettent de calculer la résistance d'un tuyau ou d'une sphère.

Si h est la charge du fluide intérieur exprimée en kilogrammes par mètre carré et d le diamètre du tuyau, la force qui tend à séparer en deux parties égales, suivant un plan diamétral, un bout de tuyau d'un mètre de long, est égale en kilogrammes à hd.

La surface-résistance de métal est représentée par $2e$, e étant l'épaisseur du tuyau, et, si R est la tension maxima qu'on veuille imposer à la matière par mètre carré de surface, l'épaisseur e résultera de l'équation

$$hd = 2R.e$$

Admettons pour la fonte une tension maxima de 1 kilogramme par millimètre carré, ou d'un million de kilogrammes par mètre carré, et soit un tuyau de $0^m,50$ de diamètre soumis à une pression de 8 atmosphères ou de 80,000 kilogrammes par mètre carré, nous aurons l'équation

$$80,000.0,50 = 2.1,000,000.e,$$

qui donne

$$e = 0^m,02.$$

C'est une épaisseur suffisante, qu'on n'adoptait pas autrefois parce qu'on pensait qu'elle pouvait conduire à un mauvais moulage et donner des tuyaux défectueux.

On essaye les tuyaux en général à une pression cinq fois plus grande que celle qui doit leur être couramment imposée; on arriverait ainsi à $e = 0,10$ avec la formule précédente, et ce serait une dimension trop considérable ; avec cette formule, il suffirait de compter une pression double de la pression réelle.

Pour les tuyaux en fonte coulés debout, on a proposé la formule :

$$e = 0,0016\,n.d + 0,008,$$

dans laquelle n exprime la pression normale exprimée en atmosphères et multipliée par 5 ; si nous l'appliquons à l'exemple précédent, nous trouvons

$$e = 0^m,04$$

Voici l'épaisseur normale des tuyaux adoptés pour le service de Paris, qui peuvent convenir à une distribution quelconque : on a pris pour n la valeur 10 atmosphères.

DIAMÈTRES	ÉPAISSEUR	DIAMÈTRES	ÉPAISSEUR	DIAMÈTRES	ÉPAISSEUR
mètre	millim.	mètre	millim.	mètre	millim.
0,10	9,25	0,30	12,25	0,60	17
0,15	9,75	0,35	13,25	0,80	19
0,20	10,25	0,40	13,50	1,00	21
0,25	11,25	0,50	15,00	1,10	24

Il est indispensable de prescrire dans les devis que les tuyaux en fonte seront coulés debout; c'est le seul moyen d'obtenir une bonne fabrication. Cette manière d'opérer est, du reste, devenue la pratique courante de toutes les bonnes usines.

Machine à essayer les tuyaux. — Les tuyaux s'essayent, comme les chaudières à vapeur, au moyen d'une pompe comprimant l'eau jusqu'à une pression déterminée. — Les essais au moyen d'un gaz comprimé sont évidemment inadmissibles à cause de la force expansive du gaz; si l'appareil essayé venait à se rompre, les débris, projetés avec violence, pourraient causer les plus graves accidents.

Avec l'eau comprimée, rien de pareil n'est à craindre; l'appareil essayé peut se crever et se briser, mais la pression de l'eau tombe instantanément dès qu'elle est au contact de l'air; l'eau manque de ressort et il n'y a point de projection à craindre.

Les figures 1, 2 de la planche 10 représentent la machine à essayer les tuyaux : le tuyau est fortement serré entre deux plaques verticales en fonte, l'une fixe, l'autre mobile, maintenues par des tirants en fer; entre les tuyaux et les plaques sont interposés des matelas en cuir maintenant les joints étanches. Le tuyau est rempli d'eau au moyen de la pompe foulante, et l'air s'échappe par un petit trou qu'on ferme ensuite avec une cheville.

Avec la presse hydraulique, on détermine une pression croissante, dont le maximum dépend de la position du contre-poids de la soupape; quand le maximum est atteint, la soupape s'ouvre et la pression tombe instantanément.

Quelquefois, le tuyau se crève; quelquefois, il livre passage à des jets d'eau ou à des suintements considérables, ce qui indique des soufflures. Alors il convient de le rejeter.

IV. **Conduites en tôle.** — Les tuyaux en fer sont avantageux pour les petits diamètres; ils peuvent n'avoir qu'une faible épaisseur; mais ils sont plus sujets encore à l'oxydation que les tuyaux en fonte, et sont bientôt criblés de trous.

Malgré l'abaissement qu'a subi le prix de la fonte, les tuyaux en tôle recouverte de bitume, connus sous le nom de tuyaux Chameroy, sont d'un usage très-répandu.

Ces tuyaux, de 4 mètres de longueur, sont formés d'une feuille de tôle cintrée, rivée et soudée suivant une génératrice du cylindre. Ils sont plombés à l'intérieur et préservés par une couche de vernis ou bitume minéral et cire; à l'extérieur, la tôle est recouverte d'une couche de bitume de $0^m,01$ à $0^m,02$ d'épaisseur; pour déterminer l'adhérence de l'asphalte et de la tôle, on enroule autour de celle-ci une corde de chanvre.

A l'origine, pour opérer l'assemblage de deux tuyaux consécutifs, on appliquait sur le bout mâle un pas de vis en métal fusible et on taraudait sur le bout femelle un pas de vis semblable, on garnissait avec du chanvre et on obtenait un joint étanche, mais coûteux et rigide.

On applique maintenant un joint à emboîtement précis. Le bout mâle et le bout femelle sont enduits d'un métal fusible; le bout mâle porte quelques rainures circulaires peu profondes, dans lesquelles on enroule des brins de filasse imprégnés d'une graisse formée d'axonge et de poudre de plombagine très-fine. Toute la bague est frottée de cette même graisse; en poussant les deux tuyaux l'un dans l'autre, au moyen d'un levier, on obtient un emboîtement précis et un joint étanche.

Le vernis intérieur, bitume minéral et cire, forme une couche de 1 à 2 milli-

mètres d'épaisseur ; l'enduit extérieur s'applique en étendant le bitume sur une table en fonte saupoudrée de gravier, puis on roule le tuyau en tôle, garni de

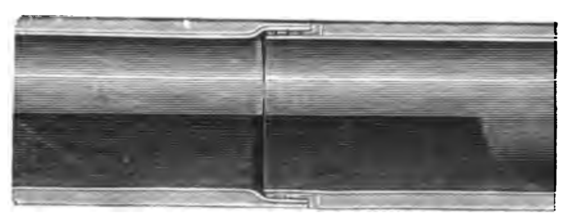


Fig. 42.

chanvre, comme nous l'avons dit, et le bitume y adhère. A la surface restent les grains de gravier incrustés dans la pâte.

Les prises d'eau sont difficiles à obtenir sur place, dans de bonnes conditions, avec les tuyaux de ce genre ; il convient de les prévoir et de préparer à l'avance les tubulures.

V. **Conduites en plomb.** — On a coulé autrefois des tuyaux en plomb jusqu'au diamètre de $0^m,216$, avec une longueur de 4 mètres.

En 1818, on a renoncé à ce mode de fabrication pour faire des tuyaux en plomb étiré ; on n'a pas dépassé le diamètre de $0^m,108$.

En 1840, on a encore substitué au procédé précédent un système nouveau qui consiste à repousser le plomb pour le faire passer par une surface annulaire et produire ainsi des tuyaux jusqu'au diamètre de $0^m,10$ inclusivement.

Pour les tuyaux d'un plus fort diamètre, on les forme avec des tables de plomb coulées d'avance. On prend dans une table une largeur égale au développement de la circonférence qui correspond au diamètre du tuyau à fabriquer, on roule cette table sur un billot et on fait une suture longitudinale.

Le plomb se rompt sous une tension de 1 kil. 35 par millimètre carré. On peut avec sécurité soumettre le plomb à une tension égale au quart de celle qui produit la rupture.

Ce qui donne pour le coefficient de résistance $R = 0^k,325$.

La résistance du plomb est donc beaucoup moindre que celle de la fonte et son prix est trois fois plus grand.

L'économie a donc fait renoncer aux grands tuyaux de plomb ; mais, par leur flexibilité et leur mise en œuvre facile, ils rendent de grands services pour l'installation des bornes-fontaines et la distribution intérieure des édifices.

Les assemblages des tuyaux en plomb se font par soudure.

PRIX DES CONDUITES

Les conduites entrent pour beaucoup dans la dépense qu'entraîne une distribution d'eau. C'est un élément intéressant à connaître.

Aussi nous avons recueilli dans divers ouvrages les prix de plusieurs espèces de conduite :

1° Dans les *Nouvelles Annales de la construction*, de 1863, nous trouvons les prix suivants :

TUYAUX A EMBOITEMENT ET CORDON AVEC JOINT AU PLOMB ET A LA CORDE GOUDRONNÉE

LONGUEUR DE CHAQUE TUYAU 2m50

Diamètre.. . . (mèt.).	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,244	0,297	0,324	0,350	0,40	0,50	0,60
Épaisseur. . . (mèt.).	0,0095	0,01	0,01	0,0105	0,011	0,0115	0,012	0,013	0,013	0,0135	0,0145	0,016	0,018
Poids. . . . . (kil.).	56	78	95	120	145	170	210	270	300	335	390	530	710
Prix par mètre. (fr.). . (Pose comprise.)	7,85	10,55	12,75	15,65	18,45	21,80	26,70	33,30	36,70	40,30	48,50	64,50	85

TUYAUX EN TOLE ET BITUME, SYSTÈME CHAMEROY

Diamètre. . . . (mètre).	0,035	0,042	0,054	0,068	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,244	0,271
Poids par mètre. (kilog.).	4	5	6	7,5	8,5	11	14	17	22	25	28	33
Prix par mètre.. (franc). (Pose comprise.)	2,05	2,50	2,65	3,00	3,80	5,25	7,00	8,70	10,50	12,20	14,40	16,65

Diamètre. . . . (mètre).	0,297	0,324	0,350	0,400	0,450	0,500	0,550	0,600	0,700	0,800	1,00
Poids par mètre. (kilog.).	39	45	52	70	78	90	95	100	125	155	210
Prix par mètre.. (franc). (Pose comprise.)	18,95	22,95	27,30	31,20	36,70	43,35	60,95	68,45	74,60	90,75	125

PRIX DES CONDUITES DE LYON

PAR MÈTRE COURANT, Y COMPRIS FOURNITURES, POSE ET TRANCHÉE, D'APRÈS LE TRAITÉ PASSÉ AVEC L'USINE DE FOURCHAMBAUD

	mètre.		francs.
Diamètre de.	0,60	Prix.	78,25
—	0,50	—	59,35
—	0,40	—	41,50
—	0,35	—	39,10
—	0,30	—	32,25
—	0,25	—	25,75
—	0,216	—	20,90
—	0,16	—	13,10
—	0,108	—	10,60
—	0,081	—	8,25

CONDUITES DE LA VILLE DE LILLE

DIAMÈTRES	LONGUEUR	Poids par mètre courant	Prix de la fonte par mètre	Pose par mètre courant tout compris	Confection d'un joint à bride, tout compris	Joint à emboîtement tout compris	Coupement d'un tuyau	Joint Delperdange tout compris
mètres	mètres	kil.	francs	francs	francs	francs	francs	francs
0,60	3,60	216	35,25	4,95	29,10	10,70	6,00	35,90
0,50	»	168	29,40	4,43	23,50	8,30	5,00	29,80
0,40	»	124	20,25	4,15	18,65	6,70	4,00	23,30
0,30	3,00	85	13,85	3,76	14,00	5,20	3,00	13,40
0,25	»	69	11,25	3,50	11,80	4,40	2,50	11,30
0,20	»	51	8,35	3,20	8,65	3,50	2,00	8,90
0,15	»	35	5,70	3,00	7,25	2,50	1,50	6,50
0,125	»	28	4,60	2,85	6,13	2,30	1,25	5,50
0,10	»	22	3,70	2,62	4,40	1,90	1,00	4,50
0,075	»	16	2,60	2,50	3,64	1,65	0,75	3,45

La pose est supposée faite à une profondeur de 1m,10; le prix indiqué comprend le démontage de la chaussée ou du trottoir, l'ouverture de la tranchée, le dressement du fond, remblai, pilonnage et enlèvement des terres en excès, transport des tuyaux à pied d'œuvre, descente des tuyaux, mise en place, ajustage et garnissage du joint au brai de goudron, essai en tranchée et repavage sur couche avec 0m,15 de sable neuf.

Le kilogramme de plomb neuf était payé.	0,75
Le percement d'un trou de 0m,013 à 0m,045 de diamètre sur une conduite en fonte.	2,00
Le percement d'un trou de 0m,05 à 0m,10 de diamètre sur une conduite	4,00
Le kilogramme de corde goudronnée.	1,00
Le kilogramme de minium préparé pour la confection des joints, dans la proportion de deux parties de céruse pour une de minium. . . .	1,00
Le kilogramme de brai de goudron pour garnissage des joints.	0,08
— de bitume.	0,55
— de cuir gras pour joints.	7,00

Voici maintenant quelques prix relatifs aux conduites pour distribution intérieure :

DÉSIGNATION DES OUVRAGES	DIAMÈTRES 0m,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06	0,075	0,10	0,125	0,15
	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
Mètre courant de tranchée à 1m,20 de profondeur, compris démontage de la chaussée et du trottoir, déblai, remblai, repavage et entretien pendant un an.	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,17	2,77	2,42	2,57
Idem, sans pavage.	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,77	0,82	0,87
Le mètre courant de tuyau en fonte, compris goudronnage, fourniture des joints, mise en place et essai.	2,60	2,80	3,10	3,40	4,00	4,70	6,00	7,50	9,00	10,50
Le mètre courant de tuyau en plomb, compris pose et soudures :										
Épaisseur. . 0m,006. . .	3,80	4,80	»	»	»	»	»	»	»	»
— . . 0m,007. . .	»	»	6,25	8,00	10,25	12,25	»	»	»	»
— . . 0m,008. . .	»	»	»	»	»	15,00	20,00	»	»	»
Conduite en fer soudé, à recouvrement.	»	3,40	3,50	4,00	5,50	6,50	»	»	»	»
Plus-value pour parties coudées. .	»	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	»	»	»	»

CONDUITES DE SAINT-ÉTIENNE

« La canalisation de Saint-Étienne, dit M. de Montgolfier, est tout entière en fonte. Les tuyaux sont à emboîtement et à cordon ; ils ne portent des brides que pour les raccords avec les appareils de la distribution. Le tableau suivant indique le poids et les principales dimensions des différents diamètres employés :

DIAMÈTRES	LONGUEUR UTILE	POIDS		ÉPAISSEURS NORMALES		EMBOITEMENTS			BRIDES				MANCHONS
		Par tuyau	Par mètre	Tuyaux droits	Tuyaux courbes	Longueur	Épaisseur	Diamètre intérieur	Diamètre extérieur	Épaisseur	Fruit	Nombre de tours	— Poids
0,50	2,50	551	196	0,016	0,02	0,13	0,021	0,556	0,682	0,024	0,003	12	241
0,30	—	276	108	0,013	0,016	0,13	0,018	0,350	0,474	0,021	—	8	112
0,25	—	215	75	0,012	0,015	0,11	0,017	0,298	0,411	0,02	—	6	82
0,216	—	171	62	0,0115	0,015	—	0,0155	0,250	0,377	0,018	—	6	66
0,192	—	146	52	0,011	0,0145	—	0,015	0,232	0,347	0,018	—	6	56
0,135	—	96	35	0,01	0,012	—	0,014	0,175	0,280	0,017	—	5	38
0,108	—	78	28	0,01	0,012	—	0,014	0,148	0,253	0,017	—	4	27
0,081	—	58	20	0,0095	0,0115	—	0,0135	0,120	0,224	0,016	—	3	20
0,054	—	34	13,5	»	»	—	»	»	»	»	»	»	»
0,04	1,50	14,5	9,7	»	»	—	»	»	»	»	»	»	»

« Les joints des tuyaux à emboîtement sont faits avec de la corde goudronnée et du plomb fondu. La corde est mattée au refus à l'aide d'un ciseau, de manière à laisser dans l'emboîtement un vide circulaire de $0^m,04$ de profondeur dans lequel on coule du plomb qui est lui même matté après le refroidissement. Les joints à brides sont faits à l'aide d'une rondelle en plomb de $0^m,015$ à $0^m,02$ d'épaisseur, ferrée dans le joint par les boulons et mattée après le serrage. »

« Les conduites ont été posées de façon que le dessus du tuyau se trouve à $1^m,40$ en contrebas du niveau du sol. Leur prix de revient au mètre courant s'établit ainsi qu'il suit :

DIAMÈTRES		0,50		0,30		0,25		0,210		0,192		0,135		0,108		0,081		0,054		0,04	
DÉTAIL POUR UN MÈTRE COURANT DE TUYAU	Prix élémentaire	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX	QUANTITÉ	PRIX
Démontage et réfection de la chaussée.	fr. 0,70	mq. 1,60	fr. 1,12	mq. 1,30	fr. 0,91	mq. 1,30	fr. 0,91	mq. 1,30	fr. 0,91	mq. 1,20	fr. 0,84	m. 1,15	fr. 0,80	mq. 1,05	fr. 0,73	mq. 1,00	fr. 0,70	mq. 1,00	fr. 0,70	mq. 1,00	fr. 0,70
Ouverture de la tranchée dans les terres fortes.	0,40	mc. 2,30	0,92	mc. 1,60	0,64	mc. 1,50	0,60	mc. 1,43	0,58	mc. 1,40	0,56	mc. 1,25	0,50	mc. 1,10	0,44	mc. 1,00	0,40	mc. 1,00	0,40	mc. 1,00	0,40
Dressement de fond et façon des niches.	»	»	0,40	»	0,20	»	0,17	»	0,17	»	0,16	»	0,13	»	0,10	»	0,09	»	0,08	»	0,08
Enlèvement des terres excédantes. . . .	»	»	0,30	»	0,20	»	0,17	»	0,17	»	0,16	»	0,13	»	0,10	»	0,09	»	0,08	»	0,08
Remblais pilonnés.	0,25	2m30	0,57	1,60	0,40	1,50	0,36	1,45	0,36	1,40	0,35	1,25	0,31	1,10	0,27	1,00	0,25	1,00	0,25	1,00	2,05
Fourniture de la fonte.	0,165	221	36,46	111k	18,32	86k	14,19	69k	11,39	58k	9,57	38k	6,27	31k	3,11	20	3,30	14k	2,31	9	1,43
Transport à pied d'œuvre, descente et mise en place.	»	»	1,00	»	0,80	»	0,75	»	0,75	»	0,70	»	0,60	»	0,55	»	0,40	»	0,30	»	0,25
Plomb, corde goudronnée et façon des joints.	»	»	5,00	»	3,00	»	2,80	»	2,50	»	2,00	»	1,40	»	1,20	»	0,90	»	0,70	»	0,60
TOTAL.			45,77	»	24,47	»	19,95	»	16,93	»	14,34	»	10,14	»	8,50	»	6,13	»	4,82	»	3,84
Outils, faux frais et bénéfices $\left(\frac{1}{10}+\frac{1}{20}\right)$.			6,86	»	3,67	»	2,99	»	2,64	»	2,15	»	1,52	»	1,27	»	0,92	»	0,72	»	0,58
Prix d'application par mètre courant de conduite. . .			52,63	»	28,14	»	22,94	»	19,57	»	16,49	»	11,66	»	9,77	»	7,05	»	5,54	»	4,42

Importance des fuites dans les conduites. — M. Whitney, ingénieur américain de Cambridge (Massachussets), signalait dans ces dernières années, à une réunion de la Société américaine des Ingénieurs civils, la diminution notable de la quantité d'eau distribuée à Cambridge, diminution qui pouvait devenir dangereuse en cas d'incendie. Des observations furent faites à l'aide de siphons et de manomètres ; elles avaient lieu le matin alors que la consommation est presque nulle. On trouva des fuites nombreuses et considérables qui furent rapidement étanchées ; aussitôt, et sans agrandissement de la conduite maîtresse, on obtint un surcroît de charge de $10^m,67$ et on put assurer l'alimentation de chaque maison. On reconnut que bien des fuites faisaient perdre 4 à 5 mètres cubes par heure.

Bien que la pose des tuyaux soit généralement faite chez nous avec plus de soin qu'en Amérique, il doit exister dans les canalisations en tranchée bien des fuites du genre de celles que nous venons de signaler. Ces fuites peuvent exister longtemps sans que l'on s'en aperçoive; car l'eau ne paraît à la surface qu'autant que c'est de ce côté qu'elle trouve la voie d'écoulement la plus facile.

Dans l'opinion des ingénieurs américains, il existe beaucoup de distributions où la moitié de l'eau n'arrive point à la destination.

On peut se rendre compte de l'influence d'une faible fuite au moyen du calcul suivant :

Soit un trou carré de 1 millimètre de côté, sur lequel s'exerce une charge d'eau de 16 mètres : l'eau en sortira avec une vitesse égale à 4 fois $\sqrt{2g}$ ou à 17 mètres ; le débit, avec le coefficient 0,6, sera donc à la seconde de $0^{mc}00001$ environ, soit de 1 centilitre. En vingt-quatre heures ce débit atteindra 864 litres, et si, dans une canalisation importante, il y avait un millier de fuites de ce genre, on perdrait 864 mètres cubes d'eau par vingt-quatre heures.

L'étanchéité des joints doit donc être la préoccupation constante des constructeurs.

Pressions dues à la congélation de l'eau. — Les conduites mal protégées périssent souvent par l'effet des pressions dues à la congélation de l'eau qu'elles renferment.

Nous avons vu, en physique, combien était considérable la force expansive de l'eau qui passe de l'état liquide à l'état solide. La densité de la glace est de 0,918, de sorte que le volume solide est au volume liquide dans le rapport de 1,089 à 1.

Des expériences anciennes ont mis en évidence la force expansive de l'eau qui se liquéfie : Huyghens a fait crever un canon de fusil rempli d'eau et placé tout fermé dans un mélange réfrigérant.

Dans des expériences récentes, MM. Martins et Chancel ont fait éclater des bombes de $0^m,32$ de diamètre extérieur et de $0^m,039$ d'épaisseur, remplies d'eau et plongées dans un mélange réfrigérant ; sous l'influence de la pression, le point de congélation de l'eau s'abaissait jusqu'à un certain moment où la résistance de la bombe était vaincue. La rupture des projectiles s'est produite sous des pressions qu'on peut évaluer à 500 ou 520 atmosphères.

Le point de congélation de l'eau s'abaisse de 1 degré pour une pression de 133 atmosphères ; il y a donc eu un abaissement de 3 à 4 degrés, ce qu'on a pu en effet constater par un thermomètre plongé dans la partie restée liquide au centre de la bombe.

On ne saurait donc résister efficacement aux pressions produites par la congélation de l'eau; il n'y a qu'une chose à faire, c'est de mettre toutes les conduites

et tous les appareils fermés et pleins d'eau à l'abri de la gelée. C'est une précaution indispensable.

Incrustations et dépôts dans les conduites. — Il se produit dans les conduites en fonte des dépôts de diverses natures : des dépôts boueux ou calcaires et des dépôts ferrugineux formés par action sur la matière même des conduites. Les dépôts boueux sont assez rares et ne peuvent se produire que dans les conduites à très-faible pression ; il est, en tout cas, facile de s'en débarrasser s'ils deviennent gênants.

1° *Dépôts calcaires.* — Nous avons vu que le bicarbonate de chaux était soluble dans l'eau en proportion notable ; mais l'excès d'acide carbonique se dégage lorsque l'eau est agitée et exposée à l'air, le carbonate simple ne peut plus rester en dissolution et se dépose sur les parois des conduites, qu'il ne tarde pas à obstruer. C'est le phénomène bien connu des fontaines incrustantes.

Lorsque les dépôts renferment en outre du sulfate de chaux, ces dépôts sont durs et adhérents. En Bavière, on se sert de conduites en bois ou les eaux salines déposent une couche de gypse qui obstrue le tuyau en quelques années ; on atténue le mal en faisant circuler de temps en temps dans les conduites de l'eau douce qui redissout le sulfate de chaux.

Les dépôts formés dans les conduites de l'eau séléniteuse d'Arcueil, à Paris, ont la composition suivante :

0,90	de carbonate de chaux,
0,06	— de magnésie,
0,022	— de sulfate de chaux,
0,018	— de matières organiques et oxyde de fer.
1,000	

On pourrait à la rigueur se débarrasser des dépôts calcaires en laissant séjourner dans les conduites pendant quelque temps une eau légèrement acidulée à l'acide chlorhydrique ou à l'acide azotique, mais l'opération demanderait à être conduite avec précaution et arrêtée au moment où l'attaque du métal prendrait des proportions dangereuses.

Le mieux serait encore de relever succcessivement les diverses sections des conduites, et de les soumettre à un grattage méthodique.

Nous signalerons pour mémoire les obstructions produites dans les conduites par les racines d'arbres qui pénètrent dans les joints et développent à l'intérieur des végétations ayant la forme d'une queue de renard ; ces accidents n'arrivent guère que dans les tuyaux de drainage ; on y remédie en relevant la conduite.

2° *Dépôts ferrugineux..* — La formation des dépôts ferrugineux, qui ont affecté à Grenoble et à Cherbourg la forme de tubercules localisés, est nettement expliquée dans la *Chimie technologique* de MM. Debize et Mérijot ; nous leur empruntons les lignes suivantes :

« On sait que la rouille se produit seulement quand le fer est en contact avec l'oxygène en présence de l'eau. Mais, l'effet de l'eau dans ce cas dépend entièrement des principes qu'elle renferme en dissolution, et l'on est porté à croire notamment que l'azotate d'ammoniaque joue un rôle important. Ce sel, il est vrai, ne se trouve dans les diverses eaux qu'en très-faibles doses, mais il existe toujours même dans l'eau distillée.

« La réaction est du reste facile à comprendre : l'acide azotique détermine l'oxydation du fer ; il se forme d'abord de l'oxydule qui passe à l'état d'oxyde en

empruntant à l'air son oxygène, cet oxyde est précipité à l'état d'hydrate par l'ammoniaque, avec ou sans entraînement des matières organiques, suivant les cas, et l'azotate d'ammoniaque se reformant détermine de nouveau l'attaque du fer. Kersting a fait des essais comparatifs sur l'action de l'eau distillée seule, de l'eau distillée avec divers sels, de l'eau de la Duna et de l'eau du canal de la Duna à Riga. Après douze heures de contact, 5 kilogrammes d'eau avaient enlevé aux tuyaux de fonte les quantités suivantes en milligrammes :

Eau distillée de.	17mm,16 à 33mm,66
— avec 1p. 0/0 d'azotate de potasse.	63mm,36
— — d'azotate d'ammoniaque.	168mm,96
— — de carbonate de soude..	2mm,64
Eau de la Duna.	7mm,92 à 11mm,54
Eau du canal de la Duna..	23mm,08 à 11mm,54

Après un contact de vingt-quatre heures, la quantité enlevée était:

Pour l'eau distillée.	59mm,90
— de la Duna.	101mm,64
— du canal de la Duna. .	63mm,36

« Après l'essai, l'eau paraissait trouble, jaune ou verdâtre, et avait souvent une saveur d'encre. Cette saveur, due à l'oxydule dissous, disparaissait du reste aussitôt à l'air, par suite de la formation de l'oxyde.

« L'action de l'eau sur la fonte est donc extrêmement variable, et s'élève très-notablement par la présence des azotates. En même temps, on voit que le carbonate de soude, en donnant une réaction alcaline à l'eau, réduit notablement l'attaque. Dans certaines circonstances, d'ailleurs assez rares, probablement quand l'eau et le fer possèdent à la fois les conditions propres à une action chimique, il se forme par l'oxydation du fer des excroissances tuberculeuses qui peuvent devenir assez fortes, comme on l'a vu par exemple à Grenoble, pour réduire de moitié le débit de la conduite. Les dépôts rencontrés à Grenoble contenaient de l'oxydule et de l'oxyde de fer avec de l'acide carbonique, de l'eau, de la silice et du graphite. Ils se forment de préférence en certains points, beaucoup plus facilement sur la fonte grise que sur la fonte blanche, et, quand ces deux variétés de fonte existent à la fois, exclusivement sur la grise. Leur formation est facilitée par la présence du sel marin. Dans une dissolution saturée de chlorure de sodium et de carbonate de soude, étendue de 75 volumes d'eau aérée, l'oxydation se produit déjà au bout d'une minute (Payen). On n'a pas d'ailleurs cherché si l'azotate d'ammoniaque intervenait dans ces formations, parce qu'on ne connaissait pas à cette époque son action. Dans le sol de Paris, les tuyaux en fonte se rouillent très-vite, probablement par suite de la prédisposition de ces terrains à donner des nitrates. Dans d'autres cas, des conduites ont été retrouvées au bout de deux cents ans parfaitement intactes.

« Comme la rouille et les dépôts ferrugineux n'atteignent que très-rarement des proportions nuisibles, on néglige, en général, de prendre aucune précaution contre ces sortes d'altérations, ou bien l'on se borne à enduire le tuyau, avant la pose, d'un lait de chaux. On devrait de préférence, et bien que cette opération entraîne plus de travail et plus de frais, peindre l'intérieur du tuyau fortement chauffé, soit avec de l'huile de lin, soit avec du goudron. »

Dans une note, insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées de* 1851, M. l'ingénieur Gaudin a étudié les obstructions tuberculeuses des conduites d'eau de Cherbourg, et a décrit un appareil dont il s'est servi pour enlever les tubercules et nettoyer les tuyaux. Cet appareil est comme un hérisson à pointes de fer que l'on fait aller et venir dans les conduites et qui en râcle l'intérieur. On imaginera facilement une disposition analogue.

Action de l'eau sur les conduites en plomb. — Il a été entrepris dans ces derniers temps, à Paris, une véritable croisade contre les tuyaux en plomb qui, prétendait-on, sont attaqués par l'eau et la rendent impropre à l'alimentation en la chargeant de sels vénéneux.

L'éminent directeur des eaux de Paris a examiné la question dans diverses notes qu'il a présentées à l'Académie des sciences.

Depuis des siècles, le plomb est employé à la confection des conduites sans qu'on ait signalé d'accidents sérieux; une si longue expérience est déjà une présomption d'innocuité.

Les conduites publiques sont presque entièrement en fonte ou en tôle bitumée; c'est surtout dans les branchements particuliers que le plomb est mis en œuvre; leur longueur totale peut être évaluée à 1,500 kilomètres.

Dans tous ces branchements, l'eau ne séjourne au plus que six à neuf heures, à moins qu'il ne s'agisse de maisons inhabitées.

La surface intérieure des tuyaux en plomb, quelque anciens qu'ils soient, est toujours parfaitement lisse et recouverte d'une patine adhérente qui empêche le contact du métal et de l'eau.

Le plomb, plongé dans de l'*eau distillée*, est, comme la chimie nous l'enseigne, attaqué avec une excessive rapidité; il se forme en quelques instants une quantité de petits cristaux blancs d'hydrate d'oxyde de plomb qui se précipite, et l'acide sulfhydrique détermine dans la liqueur un abondant précipité noir de sulfure de plomb.

Mais, dès que l'eau n'est plus chimiquement pure et qu'elle renferme des parcelles de sels minéraux, elle n'attaque pas le plomb. La présence des sels de chaux, même à dose minime, est très-efficace; en l'absence de la chaux, d'autres sels paraissent aussi capables de protéger le plomb à la dose de $0^{gr},1$ par litre; tels sont le sulfate de soude, les chlorures de sodium et de potassium, le sulfate de magnésie.

Une eau très-pure, comme celle du puits de Grenelle qui ne marque que 8° ou 10° à l'hydrotimètre, n'attaque pas le plomb.

L'eau de pluie ne l'attaque sérieusement que si elle a été recueillie, non pas au commencement de la pluie, mais en quelque sorte après un lavage prolongé de l'atmosphère.

Il serait donc imprudent de laisser circuler et séjourner de l'eau pluviale dans des vases ou conduites en plomb.

En réalité, les eaux ne peuvent être considérées comme réellement inoffensives que lorsqu'elles renferment des sels calcaires : c'est le cas général; cependant certaines eaux de drainage peuvent ne renfermer que des nitrates; l'attaque du plomb se produit alors et l'empoisonnement est à redouter.

Il faut éviter de mettre en contact direct le plomb et le fer en présence de l'eau, parce qu'il se forme un couple voltaïque, capable d'activer la réaction chimique.

Les analyses très-précises semblent montrer, en définitive, que l'eau qui circule dans les conduites en plomb, finit par enlever à la longue une certaine partie du métal, si celui-ci ne se trouve point protégé, ce qui est le cas ordinaire,

par une patine adhérente; mais la proportion de plomb est tellement faible en général qu'elle est sans danger pour la santé publique.

Si l'eau n'est pas trop chargée de matières organiques, si elle ne séjourne pas trop longtemps dans les tuyaux, elle ne peut devenir nuisible.

D'après le chimiste Schwartz, on pourrait défendre les tuyaux en plomb contre l'oxydation, en les plongeant pendant 15 minutes dans une solution concentrée de foie de soufre : le plomb se recouvre d'une sorte de vernis adhérent qui met le métal à l'abri du contact de l'eau.

2° APPAREILS ACCESSOIRES DES CONDUITES. ROBINETS. VENTOUSES

Les appareils accessoires des conduites principales sont les robinets et les ventouses.

Il existe deux genres de robinets au point de vue des fonctions : ce sont les robinets d'arrêt, destinés à isoler du réseau une conduite quelconque, que l'on veut mettre en chômage pour une raison ou pour une autre, et les robinets de décharge destinés à permettre la vidange des conduites.

Les robinets les plus en usage sont les robinets à boisseau et les robinets vannes;

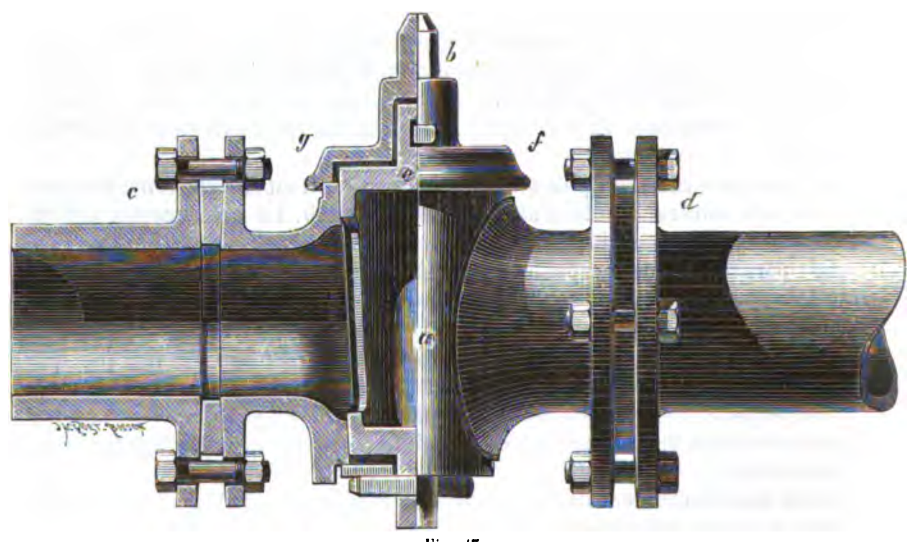


Fig. 43.

les premiers conviennent aux conduites de petit diamètre et les seconds aux conduites de grand diamètre.

Robinet à boisseau. — Le robinet à boisseau, est bien connu; il est représenté par la figure 43, moitié en élévation, moitié en coupe longitudinale. Il est placé sur un bout de tuyau droit, terminé par des brides *c* et *d* qui s'assemblent avec les brides des deux portions de conduites à réunir. Le boisseau (*a*) est un tronc de cône percé de part en part d'un orifice égal à celui des conduites; si cet ori-

fice est dans l'axe des conduites, la communication est établie; si, au contraire, on le tourne de 90° la communication est interceptée.

Pour imprimer au boisseau son mouvement de rotation, on se sert d'une clef, d'un système identique à celui de la clef de montre, qui s'engage dans le mamelon *e* à section carrée. — Le robinet est, comme nous savons, à une certaine

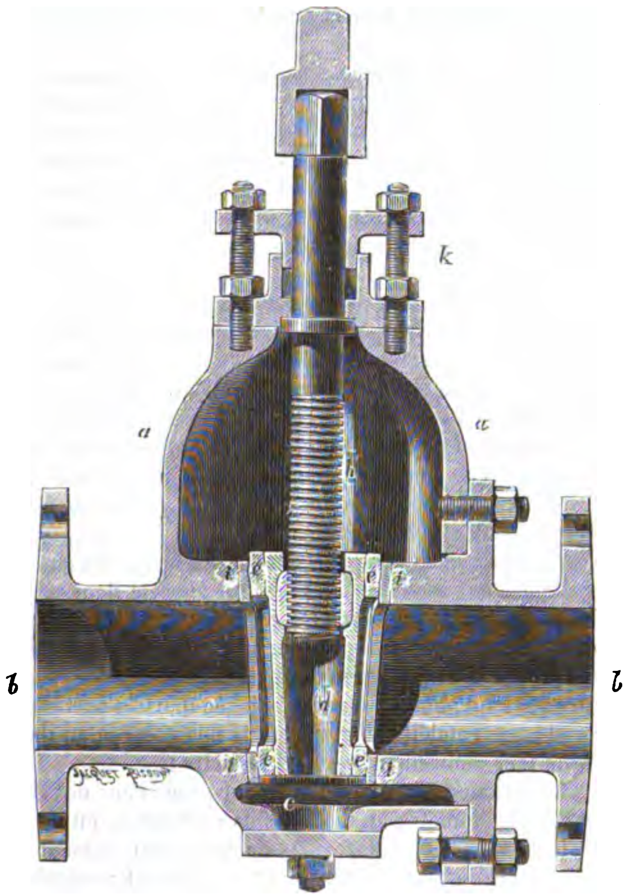


Fig. 44.

profondeur sous terre; on le manœuvre avec une clef qui s'introduit dans un manchon cylindrique en bois, fermé par un tampon de fonte au niveau de la voie publique.

La clef avec sa longue tige en fer est très-pesante; si elle agissait de tout son poids sur le robinet (*a*), elle le presserait énergiquement contre les parois de sa boîte, le frottement serait considérable et la manœuvre pourrait devenir difficile. On évite cet inconvénient au moyen du chapeau en fonte *bgf*, qui entoure le carré *e* et lui communique le mouvement de rotation que la clef lui imprime par le carré *b*; ce chapeau repose par sa base *gf* sur le sommet de la boite du robinet et non sur le robinet lui-même; celui-ci n'est donc soumis à aucun effort vertical et obéit sans peine au mouvement de rotation. Les figures 1 et 2 de la

planche 13 représentent le dispositif complet d'un robinet d'arrêt, système Fortin-Hermann, établi pour la ville de Paris.

Robinet vanne. — Le robinet vanne est aujourd'hui d'un usage général pour les conduites d'un diamètre un peu fort; cependant, il s'applique bien aussi aux conduites de faible diamètre. La boîte du robinet vanne est en fonte et se compose de trois parties principales qui s'assemblent au moyen de brides; les faces d'assemblage sont aplanies au tour et enduites de minium pour assurer leur étanchéité, fig. 44.

La partie supérieure est composée d'une calotte sphérique *a a* où se loge la vanne quand elle est levée. Les deux autres parties sont des portions de tuyaux à brides *b*, *b* dans lesquels on a ménagé les coulisses et le siége nécessaires pour recevoir la vanne. Le système de boîte permet de visiter le robinet en enlevant simplement la calotte supérieure, il est dû à M. Herdevin. La partie inférieure *c* est munie d'une tubulure fermée par un disque assujetti par des boulons; on l'ouvre de temps en temps pour enlever les ordures, que l'eau entraîne dans la tubulure.

La vanne *d* est formée de deux disques fondus ensemble et réunis par leur face latérale et par leur partie supérieure. Les parois planes de ces disques sont légèrement inclinées sur la verticale; elles portent sur leur pourtour de légères saillies de 0^{m},04 à 0^{m},05 de largeur, correspondant à la paroi cylindrique du tuyau lorsque la vanne est fermée. Sur ces saillies parfaitement dressées on fixe, avec des vis en bronze à tête fraisée, des cercles de bronze *ee* de 8 à 10 millimètres d'épaisseur que l'on dresse également avec le plus grand soin. Les parois correspondantes de la boîte sont munies de cercles pareils *ii* et c'est par leur intermédiaire que le contact a lieu.

Cette vanne est guidée, dans son mouvement de levage ou de descente, par deux oreilles saillantes sur ses faces latérales qui glissent dans une coulisse ménagée pour elles et venue de fonte dans les parois de la boite.

Cette coulisse est cachée sur la figure par la projection de la tige. Celle-ci *h* est en bronze; elle traverse un écrou de même métal logé dans le dessus de la vanne, et d'autre part une boîte à étoupe *k*, logée dans la partie supérieure du dôme de l'appareil; une rondelle, engagée dans une rainure au-dessous du stuffing box, empêche tout mouvement vertical de cette tige.

A Paris, les robinets, au-dessus de 0^{m},08, sont posés dans des regards en maçonnerie de 1 mètre de diamètre au moins, s'ils sont ronds, ou de 0^{m},90 de côté s'ils sont carrés; ces regards sont formés de murs qui laissent un intervalle libre de 0^{m},40 à 0^{m},50 au-dessous du robinet et s'élèvent verticalement jusqu'à 0^{m},70 au-dessous du pavé. A cette hauteur naît une voûte en arc de cloître dont le sommet est percé d'une ouverture de 0^{m},65 de diamètre; celle-ci est fermée par une trappe en fonte posée sur un châssis en bois.

Les robinets plus petits, sont posés dans un espace nommé tabernacle, formé de petits murs en briques posées sans mortier de 0^{m},22 de côté en carré sur 0^{m},30 de hauteur. Le tabernacle est recouvert d'une planche en chêne goudronné ou en bois blanc injecté au sulfate de cuivre. Sur cette planche, percée d'un trou rond de 0^{m},081 de diamètre, s'élève un tuyau de bois ou de fonte fermé par un tampon enchaîné. Cet appareil constitue ce que l'on nomme une bouche à clef.

Un premier avantage du robinet vanne est de donner une fermeture hermétique : il est beaucoup plus facile de dresser exactement une surface plane qu'une surface conique comme celle du robinet à boisseau.

Un second avantage du robinet vanne est qu'il s'ouvre et se ferme lentement; il permet de rétrécir à volonté le passage et, grâce à sa marche progressive, il évite les coups de bélier, si dangereux dans les grosses conduites avec les fortes charges. Généralement le pas des vis est de $0^m,01$, de sorte que la vanne s'élève ou s'abaisse d'un centimètre à chaque tour de clef.

La figure 3, de la planche 13, représente le robinet vanne du système Fortin-Hermann. L'orifice d'amenée du tuyau à intercepter, est garni d'un siége en bronze *a*; la vanne *c* est elle-même garnie d'un siége en bronze *b* qui vient au contact du précédent. La vanne se meut verticalement le long de la vis *d*; lorsque l'orifice est ouvert, la vanne se loge dans l'espace *e* au-dessous de la conduite, et lorsqu'on veut arrêter le courant, on tourne la clef de la vis en sens contraire, la vanne remonte lentement, elle finit par être arrêtée par le galet *f*; à ce moment l'obturation est complète. Ce système ménage la hauteur et permet de pouvoir toujours placer un robinet là où l'on place une conduite, tandis qu'avec la chambre de la vanne située au-dessus de la conduite, on n'a pas toujours la hauteur suffisante pour installer un robinet.

Les corps étrangers qui peuvent circuler dans la conduite, n'interrompent pas le fonctionnement d'un robinet; elles tombent dans la chambre *e* et la tubulure tangentielle *g* permet de les enlever.

La bouche à clef a la forme ordinaire : la partie supérieure *h* est indépendante du tuyau vertical *i* de sorte qu'on peut remanier la chaussée sans toucher au système et sans avoir besoin de couper des tuyaux.

La figure 4 représente un robinet vanne muni d'un indicateur *k* qui indique de combien l'orifice est ouvert.

Robinet à clapet en caoutchouc. — Sur le réseau à basse pression des conduites de Saint-Étienne, M. l'ingénieur de Montgolfier a employé des robinets du système Bonin, figure 45; ils se composent de deux clapets *a*, *a* garnis de caoutchouc, mobiles autour des points *cc* et reliés par deux tiges articulées à un manchon taraudé *b* qui se meut le long d'une vis verticale, manœuvrée de l'extérieur par une clef comme la tige du robinet vanne. La vis est fixe et son écrou est mobile, de sorte qu'il entraîne les clapets dans son mouvement; ceux-

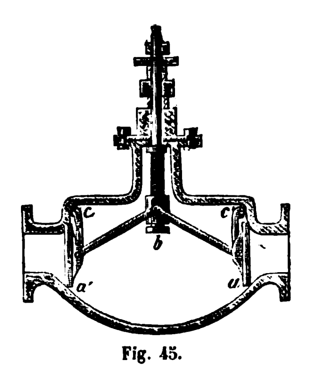


Fig. 45.



Fig. 46.

ci s'appliquent sur deux sections obliques, d'un diamètre égal à celui des portions de conduite qu'il s'agit de réunir.

Ces robinets, dont le prix est inférieur d'un $\frac{1}{8}$ à celui des robinets Herdevin ont, suivant M. de Montgolfier, donné d'excellents résultats à Saint-Étienne.

Clapet ou robinet de décharge. — Aux points bas des conduites on doit,

avons nous dit, placer des robinets ou clapets de décharge, permettant de mettre en vidange les sections correspondantes de la conduite.

La figure 46 représente la coupe d'un clapet de décharge de la distribution d'eau de Saint-Étienne, clapet fourni par les usines de l'Horme. Latéralement à la conduite principale, on place, au moyen d'un assemblage à brides, l'appareil A; l'orifice d'évacuation est fermé par une plaque horizontale en fonte *a*, garnie en dessous de caoutchouc vulcanisé; le caoutchouc s'appuie sur le rebord saillant de l'orifice; il est comprimé à volonté par la vis *b* qui se manœuvre par une bouche à clef; cette vis mobile passe dans un écrou fixe que supporte un siége en fonte, coulé en même temps que la tubulure; la tige de la vis traverse le couvercle de cette tubulure dans un stuffing box. On comprend que le caoutchouc se moule exactement sur la surface contre laquelle il est comprimé et détermine une obturation parfaite.

Le clapet étant, du reste, placé dans une tubulure latérale de la conduite principale, ne gêne en aucune façon l'écoulement. A la suite de l'orifice d'écoulement, se trouve un aqueduc qui mène les eaux soit à l'égout, soit dans un puisard absorbant.

Il va sans dire, qu'il est inutile d'adopter de grands diamètres pour les clapets de décharge ; ils n'ont jamais à livrer passage qu'à un volume d'eau relativement restreint, et il importe peu que le temps de la vidange dure quelques secondes de plus ou de moins.

A Saint-Étienne, on n'a adopté pour les orifices de vidange que deux diamètres : $0^m,135$ et $0^m,081$.

Les appareils coûtaient à l'usine.. . . .	75 et 60 francs.
Et tout posés à Saint-Étienne..	83 et 66 —

Ventouses. — Les ventouses sont des appareils placés aux points hauts d'un réseau de conduites et destinés à livrer passage à l'air contenu dans les tuyaux, lors de la mise en charge, ainsi qu'au mélange gazeux que l'eau pourrait abandonner à l'intérieur des conduites.

En Italie, on se servait de cheminées ou tubes verticaux qui s'élèvent à un niveau supérieur à celui de la source; l'équilibre hydrostatique s'établit et il n'y a pas à se préoccuper de l'émission de l'air qui se fait naturellement. Mais un pareil système est bien gênant dans les villes et devient inapplicable lorsque la charge est grande. La gelée dans nos climats serait un grave inconvénient.

Bélidor recommandait de prendre comme ventouse une soupape pesante, placée à l'extrémité d'un court tuyau vertical; lorsque l'air se trouve suffisamment comprimé, il soulève la soupape et s'échappe.

On peut recourir à un simple robinet que l'on ouvre lorsqu'on met la conduite en charge et que l'on ferme quand l'eau y apparaît; ce procédé simple a l'inconvénient de n'être pas automatique ; il peut entraîner de sérieux inconvénients.

Aujourd'hui, on ne se sert que de la ventouse à soupape, représentée par les figures 5 et 6 de la planche 9; elle a été inventée par le chevalier de Bettancourt, et appliquée pour la première fois par Girard. Elle consiste en une boule creuse en laiton, enfermée dans une chambre au sommet d'une tubulure verticale, placée au point voulu de la conduite ; cette boule a sensiblement la densité de l'eau, de sorte qu'il ne faut pour la soulever, lorsqu'elle est noyée, qu'un faible effort. Elle est surmontée d'une tige verticale qui se termine par un clapet tronc co-

nique en bronze, d'environ 0m,05 de diamètre ; en remontant, ce clapet pénètre dans un orifice égal ménagé dans le couvercle de l'appareil, l'obturation se produit et toute communication est interrompue entre l'intérieur de la conduite et l'atmosphère.

Lorsqu'on met la conduite en charge, la boule creuse est entourée d'air, elle retombe sur son siége et laisse passer l'air qui s'échappe autour d'elle ; quand l'eau arrive, la boule est noyée, elle éprouve une poussée à peu près égale à son poids et la pression de l'eau sur le clapet fait remonter la boule et le clapet qui ferme l'orifice d'émission.

Le mouvement se répète toutes les fois que l'air s'accumule dans la tubulure et que la boule cesse de plonger dans l'eau.

A Saint-Étienne, les ventouses ont toutes été posées sur tubulures de 0m,135, et ont coûté 70 francs pièce.

Il est à remarquer que la présence des ventouses est rarement utile, car on trouve, à presque tous les points hauts des conduites, soit une borne-fontaine, soit une bouche sous trottoir, et ces orifices suffisent pour l'évacuation de l'air.

La ventouse que nous venons de décrire est vraiment efficace pour la mise en charge, mais elle ne l'est pas autant pour l'émission de l'air qui peut se dégager de l'eau des conduites et s'accumuler dans les tubulures; cet air se comprime à la pression que représente la charge de l'eau au point considéré, et il peut arriver que la pression exercée par l'air comprimé sur la face inférieure du clapet soit supérieure à la force verticale qui tend à faire tomber la boule lorsqu'elle n'est plus complétement noyée.—Pour être certain que l'effet se produit, il faudrait calculer le diamètre du clapet obturateur et le volume de la boule d'après la valeur de la charge.

C'est ce que Darcy a remarqué.

Du reste, ajoute-t-il, lorsque l'on regarde attentivement couler une borne-fontaine, on s'aperçoit, aux fréquentes crépitations qui se produisent, que l'eau jaillissante entraîne beaucoup de globules d'air dans son mouvement. Je crois donc, en ce qui concerne, bien entendu, l'air tenu en suspension dans l'eau, que les conduites en sont presque radicalement purgées par les écoulements qui s'opèrent aux fontaines et aux bornes-fontaines ; que, dans ce cas, les tuyaux ouverts, les soupapes chargées d'un poids et les soupapes à flotteur n'ont qu'une action assez faible ; qu'en un mot leur utilité principale n'existe qu'au moment de la mise en charge des conduites.

Prix des robinets et ventouses. — Voici quelques renseignements sur les prix des diverses espèces de robinets :

1° DISTRIBUTION D'EAU DE DIJON.

Diamètres.	0m,35	0m,216	0m,19	0m,162	0m,135	0m,108	0m,081
Prix des robinets vannes.	819f,10	493f,50	485f,45	385f,30	344f,65	244f,80	191f,90

Diamètres.	0m,108	0m,081	0m,06
Prix des robinets à boisseau.	278f,50	184f,20	114f

Prix de revient d'une ventouse. . . . . . 89f,55.

Les prix sont actuellement beaucoup moins élevés.

2° DISTRIBUTION D'EAU DE SAINT-ÉTIENNE.

Prix et poids des robinets vanne Herdevin

DIAMÈTRE DES ORIFICES	ÉCARTEMENT ENTRE LES BRIDES	DIAMÈTRE DES BRIDES	HAUTEUR DU ROBINET	POIDS	PRIX	
					À L'USINE, À PARIS	POSÉ À St-ÉTIENNE
mètre	mètre	mètre	mètre	kil.	fr.	fr.
0,50	0,90	0,695	1,60	1,160	1,020	1,150
0,30	0,68	0,475	1,20	450	515	610
0,25	0,58	0,410	1,00	290	386	470
0,216	0,52	0,380	0,92	230	340	410
0,19	0,49	0,355	0,88	195	285	345
0,135	0,42	0,290	0,70	120	200	250
0,108	0,39	0,250	0,65	100	170	210
0,081	0,30	0,250	0,50	49	125	160
0,054	0,24	0,180	0,35	31	65	76

Les robinets à clapets, système Bonin, coûtaient 20 pour 100 de moins.

Prix d'un clapet de décharge tout posé de $0^m,135$ de diamètre. . . . 83 francs.
— $0^m,081$ — . . . . 66 —
Prix d'une ventouse toute posée. . . . . 70 —

3° DISTRIBUTION D'EAU DE LILLE

1° Prix des robinets vannes d'arrêt

DIAMÈTRE	PRIX	ENTRETIEN 1re ANNÉE	ENTRETIEN 2e ANNÉE	ENTRETIEN COURANT ANNUEL	DIAMÈTRE	PRIX	ENTRETIEN 1re ANNÉE	ENTRETIEN 2e ANNÉE	ENTRETIEN COURANT ANNUEL
mètre	fr.	fr.	fr.	fr.	mètre	fr.	fr.	fr.	fr.
0,60	820	5,00	5,00	10,00	0,20	200	1,75	1,75	3,50
0,50	630	4,00	4,00	8,00	0,15	150	1,50	1,50	3,00
0,40	460	3,00	3,00	6,00	0,125	125	1,00	1,00	2,00
0,30	310	2,50	2,50	5,00	0,10	95	1,00	1,00	2,00
0,25	250	2,00	2,00	4,00	0,075	70	1,00	1,00	2,00

Le prix d'entretien comprend aussi les frais de manœuvre.

Pour loger les principaux robinets, on a exécuté des regards en maçonnerie, qui ont coûté chacun 125 francs ; il faut donc ajouter ce chiffre aux nombres précédents.

2° Prix des robinets de décharge (boisseau).

Diamètre.	0^{m},20	prix 200 fr.	Diamètre.	0^{m},125	prix 125 fr.	Diamètre.	0^{m},075	prix 70 fr.
—	0^{m},15	— 150	—	0^{m},10	— 95	—		—

Prix d'une ventouse. . . . . . 140 francs.

4° DISTRIBUTION D'EAU DE LYON

			KILOG.		FRANCS.
Robinets d'un diamètre de.	0^{m},60. . .	poids. . .	6,300. . .	prix. . .	1,335
—	0^{m},50. . .	— . . .	5,025. . .	— . . .	1,070
—	0^{m},40. . .	— . . .	3,700. . .	— . . .	795
—	0^{m},35. . .	— . . .	3,100. . .	— . . .	668
—	0^{m},30. . .	— . . .	2,550. . .	— . . .	551
—	0^{m},25 . .	— . . .	2,300. . .	— . . .	490
—	0^{m},108.. .	— . . .	1,000. . .	— . . .	300
—	0^{m},08. . .	— . . .	825. . .	— . . .	178

Le prix comprend la fourniture et la pose.

Les ventouses avaient un poids de 375 kilogrammes; elles ont été fournies au prix de 20 francs les 100 kilogrammes.

Le prix de la pose a été de 8 francs.

Le prix total d'une ventouse mise en place a été de 83 francs.

3° APPAREILS DE DISTRIBUTION PUBLIQUE

Les appareils de distribution publique ont deux fonctions distinctes : 1° l'arrosage des rues et accidentellement l'alimentation des pompes à incendie; 2° l'alimentation publique.

Certains constructeurs se sont surtout préoccupés de la première de ces fonctions et ont placé les appareils de distribution de manière à arroser la plus grande surface possible de la voie publique.

C'est là, en somme, une fonction secondaire, quand on la compare aux besoins domestiques.

De la multiplicité des bornes-fontaines. — On doit chercher principalement à mettre l'eau à la portée de tous, surtout dans les quartiers où se trouve agglomérée la population ouvrière.

« Le lavage des rues, disait M. Emmery, inspecteur général des ponts et chaussées, est sûrement bien utile; mais consultez les hommes de l'art, reprenez tous les procès-verbaux des commissions sanitaires, et ils vous diront qu'il est bien autrement important de laver les allées des maisons, les petites cours intérieures mal aérées, les lieux d'aisances qui y sont ordinairement placés, les rez-de-chaussée. Ils ajouteront qu'il faut surtout donner à la classe malheureuse la possibilité de multiplier gratuitement les lavages de toute espèce, soit du corps, soit du linge qui souvent se trouve réparti en si faible proportion à chaque individu. Voilà, vous répéteront-ils, comment vous attaquerez avec quelque profondeur la question de l'assainissement intérieur d'une grande ville. Tel est le service immense que rendent les puisages gratuits aux bornes-fontaines. »

Ces principes ne doivent pas être perdus de vue lorsqu'on projette une distri-

bution d'eau; sans doute, la multiplicité des bornes-fontaines pourra nuire dans les premiers temps aux abonnements privés, mais cet inconvénient ne durera pas, et la distribution d'eau à domicile offre tant d'avantages que les propriétaires assez riches pour l'installer arriveront un jour ou l'autre à le faire.

Les appareils de distribution publique comprennent :

1° Les bornes-fontaines;

2° Les bouches sous trottoirs, pour arrosage ou pour alimentation des pompes à incendie;

3° Les poteaux d'arrosage;

4° Les fontaines publiques et jets d'eau.

1° **Bornes-fontaines.** — Les figures 6 de la planche 13 représentent la borne-fontaine à repoussoir de la ville de Paris.

Un tuyau en plomb de 27 millimètres de diamètre intérieur, amène les eaux de la conduite principale.

Cette soupape est destinée à ouvrir et à fermer alternativement l'orifice qui laisse passer l'eau dans l'ajutage extérieur *m* de la borne.

La soupape *e* est placée au bas d'une tige verticale qui se termine à l'extérieur et au sommet de la borne par un bouton *f*.

La course de la tige verticale est limitée d'un côté par l'écrou *n*, de l'autre par le tampon *i*; l'écrou *n* est mobile et, en le relevant, on peut maintenir la soupape un peu au-dessous de son siége et obtenir un écoulement continu.

Dans le cas de l'écoulement discontinu, l'obturation est assurée par le levier *p* muni du contre-poids *g*; ce levier tend à soulever la tige verticale; il maintient la soupape sur son siége et concourt ainsi à l'effet de la pression de l'eau.

Une porte à clef *q*, située à la partie supérieure de la borne, permet de visiter et de régler le robinet à volonté.

Cet appareil est simple, solide et peu sujet à dérangement.

L'égout de l'ajutage *m* tombe dans une cuvette recouverte d'une grille à barreaux, et la cuvette communique avec le ruisseau par une gargouille en fonte.

Lorsque la borne-fontaine est bien construite, les fuites ne sont pas à redouter; cependant, comme un faible suintement pourrait à la longue remplir la borne, ce qui l'exposerait à la rupture lors des gelées, il convient de ménager à la base de l'enveloppe en fonte un orifice d'évacuation pour les suintements.

Les figures 5 de la planche 13 représentent un système analogue, mais plus complet, établi par la maison Fortin-Hermann. — Le système ponr l'alimentation publique est le même; l'eau s'écoule par l'ajutage *m* lorsqu'on presse le bouton *f*. — Sur le côté est une soupape *r*, que l'on ouvre au moyen d'une clef introduite par l'orifice *x*; cette soupape ouverte, l'eau s'échappe en *s*, le courant s'écrase dans la coupelle *t* et tombe à la partie inférieure du coffre de la borne-fontaine, dans ce qu'on appelle le souillard, d'où l'eau s'en va directement au ruisseau par le chemin *uv*; cela permet à la borne-fontaine de remplir la fonction de bouche d'arrosage. — Elle remplit en outre la fonction de bouche d'incendie, car la coupelle *t* fait partie d'une porte latérale qu'on peut ouvrir; la tubulure *s* est alors libre, et comme elle se termine par un pas de vis, elle peut recevoir le raccord des tuyaux qui alimentent les pompes d'incendie.

L'appareil, ingénieusement disposé, répond donc aux trois grands besoins : l'alimentation privée, l'arrosage de la voie publique et la fourniture de l'eau nécessaire à l'extinction des incendies.

Prix des bornes-fontaines. — A Dijon, le prix de revient d'une borne-fontaine, tout compris, s'est élevé à 545 fr. 60.

A Lille, le prix des bornes-fontaines ordinaires, pose et fourniture, s'est élevé à 190 francs, et le prix des bornes-incongelables à 245 francs.

Le prix annuel d'entretien d'une borne-fontaine est fixé à 8 francs.

Les bornes-fontaines de Saint-Étienne, construites dans les ateliers de M. Flicoteaux, à Lyon, ont été payées, toutes posées, non compris le branchement en plomb, 164 francs, savoir :

Fourniture de la borne, de la cuvette et de la gargouille.	85 fr.
Prise d'eau complète du diamètre de $0^{m},027$ avec robinet d'arrêt.. .	64
Pose de la borne-fontaine, faux frais, bénéfice..	15
Total égal. . . .	164

2° **Bouches d'arrosage.** — La figure 1 de la planche 12 représente une bouche sous trottoir de la ville de Paris ; c'est une coupe en travers, faite par un plan vertical transversal à la chaussée.

On voit en arrière du plan de la figure le tuyau en plomb *k* qui amène l'eau de la conduite principale et qui se recourbe normalement pour arriver au robinet d'arrêt R ; en avant de ce robinet vient le tuyau *ll*, qui alimente la bouche sous trottoir et qui se recourbe à angle droit pour prendre la direction verticale et venir s'assembler avec la bouche proprement dite.

n est la soupape qui, en se levant, livre passage à l'eau ; elle est guidée dans sa course par un étrier inférieur et par une vis supérieure ; celle-ci est mise en mouvement au moyen d'une clef qui s'emmanche sur le carré *n'*.

La soupape étant levée, l'eau pénètre dans la boite *p* ; pour briser le courant et éviter toute projection du liquide, l'orifice supérieur de la boîte *p* est recouvert d'une cloche renversée *o*, qui rejette les eaux dans le couloir *q*, d'où elles gagnent le caniveau, fig. 2.

Le robinet d'arrêt R est manœuvré par la tige verticale *l'*, posée à demeure et terminée par le carré *s* qui se manœuvre au moyen d'une clef.

La bouche entière est recouverte d'une plaque en fonte dont la surface est formée de pointes de diamant : dans cette plaque *tu* sont ménagées deux portes dont on voit les charnières en *v* et *x*, qui ne s'ouvrent qu'avec des clefs.

Ainsi, la manœuvre consiste à ouvrir les deux portes en fonte, à tourner la tige du robinet d'arrêt avec une première clef à carré, et enfin à lever la soupape *n* avec une seconde clef à carré *n'*.

Lorsque le robinet d'arrêt demeure ouvert, on n'a qu'à agir sur le carré *n'*, auquel correspond un orifice libre de la plaque en fer *ut*, et il n'est pas besoin d'ouvrir les deux portes de cette plaque. La coupelle *o* permet de modérer à volonté le débit de la bouche ; en effet, en remontant ou en abaissant cette coupelle, on élargit ou on rétrécit l'orifice d'écoulement.

Les figures 3, 4, 5, de la planche 12 représentent une bouche d'arrosage carrée, avec prise d'eau de $0^{m},027$ et raccord de $0^{m},041$.

L'eau arrive, comme tout à l'heure, par un tuyau en plomb *l* de $0^{m},027$ de diamètre dans une boîte *a*, fermée par une soupape tronc-conique *b* ; la tige verticale de cette soupape est filetée et traverse un écrou fixe, elle se termine en haut par un carré sur lequel agit la clef *c*, qui permet de lever la soupape ou de l'appuyer sur son siége. La soupape étant levée, l'eau s'échappe par la tubulure *t*, remplit la boîte en fonte *ef*, d'où elle s'épanche à l'extérieur ; le tuyau *u* sert à vider la boîte en fonte ou bien encore à conduire au caniveau l'eau, qui arrive dans cette boîte.

Mais, l'appareil n'est pas destiné à fonctionner de cette manière ; la tubulure *t* se termine par une vis, à laquelle on peut adapter l'extrémité d'un tuyau d'arrosage avec lance, ou bien un col de cygne *dd*, terminé par un robinet à soulèvement *r* ; la bouche peut servir alors à l'alimentation ordinaire ou à l'alimentation d'une pompe à incendie.

La boite d'arrosage est fermée par une plaque de fonte *mn*, dont on voit la charnière en *n* ; cette plaque se ferme à clef, mais elle porte un orifice rond par lequel on peut introduire la clef qui manœuvre la soupape *b*, de sorte qu'on n'a besoin de lever la plaque que pour visiter l'appareil.

Bouche d'eau de Saint-Étienne. — « Les bouches d'eau de Saint-Étienne, dit M. de Montgolfier, sont circulaires et ont $0^m,20$ de diamètre. Elles renferment, sous un même couvercle en fonte, l'extrémité de la tige du robinet de prise d'eau qui se trouve à $0^m,80$ en contre-bas dans le sol, le robinet de service qui permet de régler le débit de la bouche et enfin, un raccord à incendie et à arrosage. Lorsque le robinet de prise est ouvert, la bouche est en charge, et, en ouvrant le robinet de service, l'eau s'écoule sur la chaussée par le tuyau en plomb, qui, partant de la bouche, traverse la bordure du trottoir. Pour arroser, on enlève le couvercle qui recouvre le raccord et l'on visse le tuyau d'arrosage. Tout le mécanisme de la bouche est enfermé dans une deuxième enveloppe en fonte, de sorte qu'il peut être démonté et retiré de cette dernière, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer de déblais, ni de toucher à l'asphalte ou au dallage du trottoir.

Les bouches sont payées, toutes posées, non compris l'embranchement de plomb, 109 francs, savoir :

Fourniture de la bouche complète.	99 francs.
Pose, réfection de l'asphalte ou du dallage, etc. . .	10 —
Total. . . .	109 —

Prix des bouches sous trottoirs et accessoires à Lille. — Voici quelques prix relatifs à la distribution d'eau de la ville de Lille :

Bouche d'eau sous trottoirs à deux raccords de $0^m,04$ pour incendie, y compris robinet d'arrêt, bouche à clef et pose.	140 francs.
— à un raccord.	80
Bouche à clef comprenant la fondation, la planche en chêne du tabernacle	15
Bouche d'arrosage de jardin, à simple raccord, sans robinet d'arrêt, pose comprise	35
Fourniture d'une clef de serrure de borne fontaine.	1.25
Lance avec robinet en cuivre rouge, pour arrosage.	30
Lance coudée avec robinet de prise d'eau en cuivre.	50
Raccord complet de $0^m,04$ de diamètre, en cuivre jaune.	10
Le mètre linéaire de tuyau en cuir cloué.	8
— en caoutchouc à deux plis de toile de $0^m,04$. . . .	8
Bouche à clef en fonte (système Fortin-Hermann) complète, pour robinets de tout diamètre, fourniture et pose.	18.50

3° **Poteaux d'arrosement.** — M. Mary, lorsqu'il dirigeait le service des eaux de Paris, a fait établir des poteaux d'arrosement, figures 1 à 4, planche 9, dont l'usage s'est répandu dans les grandes villes et qui sont destinés à remplir directement les tonneaux d'arrosage et les tonneaux des porteurs d'eau.

Ce sont des poteaux creux en fonte de $2^m,89$ de haut, hermétiquement fermés.

L'eau arrive à la base par un tuyau d'embranchement ordinaire et s'élève dans la cavité du poteau, en comprimant l'air qu'elle renferme. Au centre de cette cavité est un tuyau de 65 millimètres de diamètre, qui se termine en haut par un robinet à boisseau tronc-conique; ce robinet se manœuvre au moyen d'un carré et d'une clef qu'on introduit par le sommet du poteau. Lorsqu'il est ouvert, l'eau s'échappe par un ajutage et s'engage dans un tuyau flexible en cuir, la conduisant au tonneau qu'il s'agit de remplir. A $0^m,50$ environ au-dessus du sol, le poteau porte latéralement deux marches en fonte, sur lesquelles on peut monter pour atteindre facilement le sommet du poteau et manœuvrer le robinet La section d'écoulement est assez grande, et la masse liquide en mouvement assez considérable pour que les coups de bélier, qui résultent de la fermeture brusque du robinet, soient dangereux et compromettent la solidité dn tuyau; l'air emprisonné dans le poteau, autour du tuyau central, amortit les chocs et prévient les dangers. Le poteau joue donc tout à la fois le rôle de conduite d'eau et de réservoir d'air comprimé.

4° **Jets d'eau.** — Nous ne dirons rien des fontaines monumentales, elles sont plutôt du ressort de l'architecture. La fonte à bon marché permet aujourd'hui d'établir partout des vasques surmontées de statues et d'attributs. A défaut de cette forme ornementale, on peut se contenter de vasques en ciment, qui rendent de grands services et permettent d'établir à peu de frais des fontaines ou des abreuvoirs.

Le eaux jaillissantes font le plus bel ornement de nos promenades et des places publiques des grandes villes. On ne les établit qu'exceptionnellement, cependant, nous avons cru devoir reproduire ici la planche 11, empruntée à l'ouvrage de Darcy et représentant la gerbe jaillissante de la porte Saint-Pierre à Dijon.

Nous avons donné à la page 47 les calculs des jets d'eau verticaux. L'alimentation de la gerbe de la place Saint-Pierre se fait au moyen de deux tuyaux, figures 2, 3, 4. La conduite principale de $0^m,19$ de diamètre se bifurque en deux tuyaux égaux, qui se recourbent verticalement pour aboutir dans la boîte qui se trouve à la base de la gerbe.

Un des tuyaux, figure 4, alimente le jet central; ce tuyau est fermé par un obturateur qui ne laisse libre qu'un orifice de petit diamètre, par où le jet s'élance à une hauteur donnée par la formule de la page 48; nous rappellerons que la section de l'orifice du jet doit être faible, par rapport à celle du tuyau, afin de réserver toute la charge disponible pour imprimer à l'eau jaillissante sa vitesse ascensionnelle.

Le second tuyau dégorge dans la boîte en fonte qui entoure le précédent; il alimente plusieurs orifices percés en couronne sur le couvercle de cette boîte, orifices inclinés sur la verticale.

L'eau qui s'échappe de chacun de ces orifices décrit un jet parabolique, dont il est facile de calculer la hauteur et l'amplitude, en recourant à la formule du mouvement des projectiles.

Lorsqu'on lance un projectile avec une vitesse v, suivant une direction inclinée de l'angle α sur l'horizon, la courbe qu'il décrit est une parabole ayant pour équation (Voir notre *Traité de mécanique*, page 15) :

$$y = x \tang \alpha - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{v^2 \cos^2 \alpha} \tag{1}$$

L'amplitude du jet s'obtient en faisant $y = 0$, elle est donnée par

$$x = \frac{v^2}{g} \sin.2\alpha \tag{2}$$

La hauteur maxima du jet s'obtient en remplaçant, dans l'équation de la courbe, x par la moitié de l'amplitude précédente et on trouve :

$$y = \frac{1}{2} \frac{v^2}{g} \sin^2 \alpha \tag{3}$$

Étant donnée la charge, on calcule approximativement la vitesse v d'écoulement par un orifice en mince paroi ; connaissant le rayon du bassin, on a la valeur maxima de l'amplitude, il n'y a donc que l'inclinaison α d'inconnue dans l'équation (2), et cette équation permet de la calculer.

L'équation (3) fournit la hauteur du jet.

Avantages de petits orifices dans les jets d'eau. — Pour qu'un jet d'eau s'élève à une hauteur qui s'approche du niveau de l'eau dans le réservoir d'alimentation, il faut que l'orifice de ce jet soit de faible section, par rapport à la conduite qui y aboutit, afin que l'eau contenue dans celle-ci puisse être considérée comme sensiblement en repos.

Exemple : Soit un orifice situé à 10 mètres au-dessous de la surface du réservoir d'alimentation, la vitesse de l'eau qui s'échappe par cet orifice supposé en mince paroi est $\sqrt{2gh}$, ou environ 14 mètres à la seconde.

Mais la formule $\sqrt{2gh}$ admet que la vitesse d'écoulement de l'eau dans le réservoir et dans la conduite qui lui fait suite, est sensiblement nulle, par rapport à la vitesse du jet. Si l'extrémité de la conduite était ouverte sur toute sa section, au lieu de l'être sur une faible portion, le jet ne pourrait s'élancer avec une vitesse de 14 mètres que si toute l'eau de la conduite prenait elle-même une vitesse de 14 mètres. Or, une pareille vitesse développerait des frottements énormes et absorberait une partie considérable de la charge; la hauteur du jet se trouverait donc réduite dans de bien grandes proportions.

Ainsi, il importe d'adopter pour les orifices des jets d'eau des sections inférieures à celle de la conduite alimentaire.

4° APPAREILS DE DISTRIBUTION PRIVÉE

Principes généraux. — On ne peut arriver à une distribution privée parfaite, qu'en s'imposant les règles suivantes :

1° L'eau doit arriver aux habitations pure et limpide; l'usage des filtres domestiques a de grands inconvénients et se montre souvent inefficace;

2° La distribution doit être permanente et non discontinue; en Angleterre, la discontinuité est admise et il faut, à certaines heures, emmagasiner dans des réservoirs l'eau nécessaire aux besoins de la journée; c'est, on le conçoit, une grave sujétion, et de plus l'eau risque de s'échauffer et de se corrompre;

3° L'eau doit constamment arriver à tous les robinets avec une charge suffisante pour l'écoulement; autrement, les avantages de la distribution d'eau deviennent illusoires et inspirent une fausse sécurité; il faut donc disposer de

réservoirs assez élevés, pour que la charge ait partout une valeur convenable, bien que tous les orifices soient ouverts à la fois;

4° L'eau doit arriver en tous les points où on a occasion de l'employer; il faut qu'en chacun de ces points on n'ait qu'à tourner un robinet pour obtenir l'eau dont on a besoin. Ainsi, en Angleterre, on trouve des robinets dans la cuisine, dans les lavabos, dans les cabinets d'aisance, etc.....

Ces quatre règles ne sont pas généralement observées; elles représentent un desideratum vers lequel on doit tendre. Malheureusement, elles entraînent à de grosses dépenses et on est forcé de se contenter souvent de l'à-peu près, qui, du reste, réalise dans bien des cas une amélioration incontestable. Ainsi, on se bornera, surtout dans les petites villes, à assurer l'arrivée de l'eau dans tous les rez-de-chaussée, parce qu'il serait trop coûteux d'établir des réservoirs suffisamment élevés.

Nous trouvons dans le rapport de M. l'ingénieur Huet sur l'Exposition de 1867 les renseignements suivants sur la distribution privée :

« L'Angleterre ne se préoccupe toujours que du service privé, et, à part quelques fontaines publiques pour puisage, on n'y trouve encore que la bouche à incendie.

« *Service privé.* — Paris, que nous avons déjà signalé comme un modèle, relativement à l'ampleur avec laquelle il a compris pour le présent, et prévu pour l'avenir, la question de son alimentation, se distingue encore par l'installation du service privé.

Dans les principales villes d'Angleterre et des États-Unis, ce service présente une importance bien plus considérable par suite d'habitudes qui ne pénètrent que lentement et difficilement parmi nous, mais son organisation n'y est pas comparable.

A Londres, rien de plus simple, mais rien aussi de moins satisfaisant. Le service ne se fait que successivement et par quartier, pendant deux heures sur vingt-quatre. Il faut pendant ce temps que chaque maison fasse son approvisionnement, remplisse son réservoir. L'approvisionnement se fait seul il est vrai, le trop plein s'écoule naturellement à l'égout; mais, si par suite de besoins exceptionnels le réservoir se vide avant la fin de la journée, il faut attendre au lendemain.

A Paris, le réseau complet de la distribution doit être constamment en service. Chaque maison a sa *prise d'eau* sur la conduite de la rue. L'établissement de cette prise se fait d'ailleurs régulièrement, aujourd'hui, en laissant la conduite en charge, à l'aide d'un collier dans lequel on visse le robinet, qui formera robinet d'arrêt et par l'œil duquel on perce la conduite. Un tuyau de plomb relie cette prise à la maison; sur ce tuyau et contre la façade de la maison se trouve le robinet jauge que précède un nouveau robinet d'arrêt, à la disposition de l'abonné.

La jauge est une lumière, qui est percée dans un obturateur en cuivre, et dont l'ouverture, faite par tâtonnements, résulte de la pression de l'eau au point considéré et du débit concédé en vingt-quatre heures. Avec le robinet de jauge, il faut un réservoir dans le haut de la maison pour emmagasiner l'écoulement continu. Le plus souvent la distribution est à robinet libre; c'est un forfait consenti avec l'abonné, en admettant une consommation de 45 litres par habitant, de 5 litres par mètre de cour ou de jardin, de 100 litres par cheval, de 100 litres par voiture.

Le système de *distribution par compteur*, séduisant en théorie, n'est pas ad-

mis à Paris. Il existe cependant de bons compteurs; mais les meilleurs sont susceptibles de dérangements; ils nécessitent un entretien très-suivi; ils coûtent cher d'acquisition aux abonnés; ceux qui sont basés sur la mesure d'une capacité, et présentent ainsi quelque garantie, occasionnent une perte de charge qui augmente rapidement avec le débit; enfin tous exigent, de la part des compagnies, un contrôle coûteux de la consommation. A côté de ces inconvénients, on ne doit pas attendre du système de distribution par compteurs de grands avantages pratiques; la consommation de l'eau est assez constante; elle ne varie pas comme celle du gaz et l'abonnement à forfait est, en définitive, la solution pratique à laquelle on doit tendre.

En Angleterre, où le système de distribution par compteur est admis, il ne se développe pas, pour les mêmes raisons qui l'ont fait exclure du service de Paris; à Glasgow, où l'on distribue l'eau à 100,000 familles, il y a 500 compteurs; à Londres, la proportion est la même.

Entrée dans la maison, l'eau s'y élève par la conduite ascensionnelle en plomb et rencontre à chaque étage le distributeur, caisse en zinc avec trop-plein assurant l'écoulement à l'égout en cas d'accident. Une soupape à flotteur qui prévient *le coup de bélier* y introduit l'eau tangentiellement par la partie inférieure. Cet ensemble forme un système simple, d'un bon fonctionnement, facile à visiter, à entretenir.

Dans le cas de grandes masses d'eau en mouvement, le réservoir d'air est toujours le meilleur moyen de prévenir les coups de bélier; mais cette solution n'a pu s'appliquer jusqu'ici à petite échelle dans la distribution intérieure de l'habitation; l'air du réservoir est rapidement dissous et entraîné, et l'appareil ne fonctionne plus. On a eu l'heureuse idée d'obvier à cette difficulté en isolant l'air par une couche d'huile qui flotte à la surface et est recueillie, lorsque l'eau baisse et quitte l'appareil, dans une coupelle placée à la partie inférieure.

Nous ne dirons rien des appareils qui tendent à lutter contre le coup de bélier par l'élasticité du caoutchouc; ils ne présentent généralement aucune durée, ni, par conséquent, aucune garantie sérieuse. »

Passons maintenant à la description de divers appareils en usage dans les distributions privées :

Prise d'eau à collier. — Les figures 3, 4 et 5, de la planche 10, représentent la prise d'eau à collier dont il est parlé ci-dessus, qui s'installe facilement tout en laissant la conduite en charge.

A est la conduite principale sur laquelle il s'agit de faire le percement. B est le branchement en plomb dont l'extrémité, refoulée en forme de bride, s'applique sur un cuir gras interposé entre elle et la conduite principale; la bride en plomb est elle-même recouverte d'un cuir gras.

C est le collier qui porte un orifice pour le passage du branchement et dont les deux moitiés se rapprochent et se serrent au point voulu au moyen des écrous D.

Sur le tuyau de branchement B, on soude à l'avance le robinet d'arrêt, si bien qu'en ouvrant ce robinet, on peut faire passer la mèche destinée à percer la conduite A; lorsque le percement est effectué, l'eau jaillit, on retire la mèche, on ferme le robinet d'arrêt et on termine le branchement.

Robinet de jauge. — Les figures 7, 8, 9, 10, 11, de la planche 9, représentent le robinet de jauge que l'on place sur le branchement en plomb des distributions particulières.

La coupe en travers montre que l'appareil se compose en réalité de trois ro-

binets; le robinet de jauge proprement dit est au milieu, les deux autres sont des robinets d'arrêts qui permettent de retirer de temps en temps la clef du robinet de jauge de son boisseau, et de la nettoyer.

L'entrée de l'eau dans le branchement particulier se fait par un petit trou, que l'on voit nettement sur la coupe en travers, et le diamètre de cet orifice est fixé par l'expérience, de manière à débiter au point où il est placé le volume d'eau concédé.

Ce petit orifice est précédé d'un grillage qui empêche l'introduction des ordures. Sur les carrés des trois robinets s'emmanche une barre de fer qui les rend solidaires et les maintient simultanément ouverts ; cette barre de fer est fixée par un cadenas dont la clef reste aux mains de l'administration.

La figure 6, de la planche 12, représente un robinet de jauge de MM. Fortin-Herrmann.

Ce robinet de jauge, qui comprend le robinet d'arrêt *a* et le robinet de jauge proprement dit *b*, est enfermé dans une bouche à clef semblable, sauf les dimensions, à la bouche à clef ordinaire précédemment décrite.

Généralement, les robinets de jauge sont établis sur des tuyaux en plomb et reliés aux deux parties des tuyaux par des nœuds de soudure ; on ne se servirait d'assemblages à brides que pour des tuyaux en fonte.

La manœuvre des deux robinets constituant l'appareil se fait au moyen d'une clef qui, d'un côté, porte un carré destiné à ouvrir ou fermer le robinet d'arrêt *a*, et, de l'autre côté, porte une douille à baïonnette permettant de manœuvrer le robinet de jauge et d'enlever la clef de ce robinet pour la nettoyer, faire disparaître les obstructions, vérifier ou modifier le trou de jauge.

Inconvénients du robinet de jauge. — Nous avons déjà signalé les inconvénients du robinet de jauge, qui nécessite la création d'un réservoir quelquefois considérable dans l'édifice qu'il alimente.

La constance de son débit suppose, en outre, la constance de la charge; celle-ci n'est jamais réalisée et, dans une grande distribution d'eau, la charge en un point donné peut varier de plusieurs mètres aux diverses heures de la journée ; cela se conçoit, car le niveau du réservoir d'alimentation varie, et les pertes de charge en route sont nécessairement irrégulières.

Aussi le robinet de jauge donne-t-il trop d'eau pendant la nuit, et moins qu'il n'en faut pendant le jour ; de là des réclamations.

Jauge piézométrique Chameroy. — Plusieurs appareils ont été inventés pour remédier à cet inconvénient. La figure 47 représente la jauge piézométrique Chameroy. L'eau arrive par la conduite forcée *a*, dans une cavité dont la partie centrale est occupée par un cylindre creux en fonte muni d'une fenêtre latérale *b* ; dans ce cylindre est posé un appareil mobile composé d'un cylindre vertical *c* surmonté d'une tige verticale et d'un plateau horizontal *d* ; celui-ci se meut dans un cylindre vertical *ee*, dont la section intérieure est supérieure à la section du plateau *d*, de sorte qu'il reste un intervalle annulaire libre entre ce plateau et le cylindre *ee*. Ainsi l'eau arrive en *a*, traverse la fenêtre *b*, passe dans le vide annulaire précité et gagne le tuyau *f*, qui l'emmène soit dans un réservoir libre soit dans une conduite.

La pression de l'eau s'exerce sous le plateau *d* et tend à le soulever ; à l'origine elle le soulève en effet ; mais, à mesure que le plateau s'élève, la fenêtre *b* se rétrécit, la perte de charge due à l'étranglement augmente sans cesse, la pression sous le plateau *d* diminue et l'équilibre finit par s'établir entre cette pression et le poids de l'appareil mobile *cd*. Ainsi, la pression dans l'espace *m* se

maintient constante, elle ne dépend que du poids de l'appareil ; cette pression étant constante ainsi que la surface annulaire qui donne écoulement à l'eau, le débit reste constant.

C'est la fenêtre *b* et l'appareil *c*, qui servent de régulateur automatique.

« Cet appareil, dit M. Belgrand dans une note insérée aux *Annales des Ponts et*

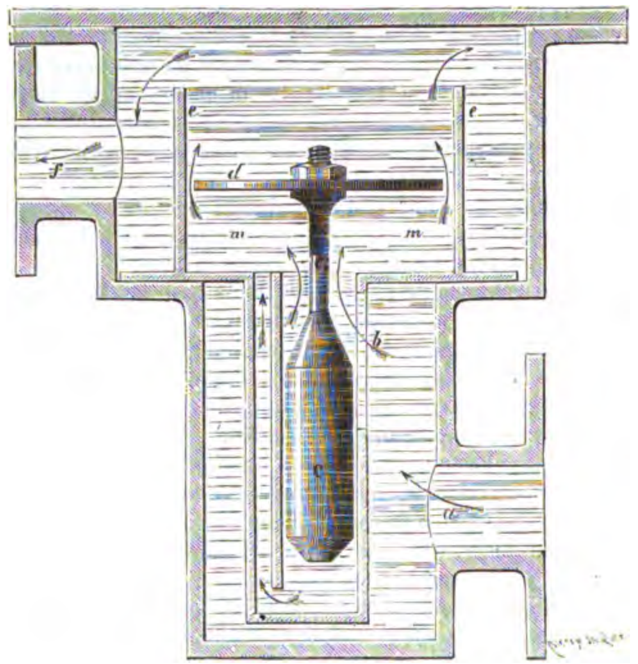


Fig. 47.

Chaussées de 1870, remédie aux inconvénients suivants des abonnements jaugés, inconvénients très-graves :

1° Il débite un volume d'eau constant sous des charges variables; les abonnements jaugés donnent lieu à des plaintes continuelles dues à la variation de pression de l'eau dans les conduites.

2° Il rend impossibles les fraudes et les détournements d'eau. Par exemple, le réservoir qui reçoit l'eau d'un abonnement jaugé étant généralement placé dans les combles, l'abonné pique des tuyaux frauduleux sur la conduite qui relie le réservoir au robinet de jauge posé habituellement sous la voie publique. Avec la jauge de M. Chameroy, on peut piquer autant de tuyaux qu'on veut sur la colonne montante et le débit n'augmente pas.

Cet appareil fonctionne depuis un an dans nos ateliers de Chaillot, avec une régularité parfaite. Je l'ai fait marcher devant moi avec des charges qui ont varié de 1 mètre à 4 atmosphères, et le débit est resté constant. M. Chameroy prétend qu'il peut en fabriquer qui ne débiteront que 500 litres en vingt-quatre heures ; s'il réussit, il aura complétement résolu le problème. »

Alimentation intermittente des réservoirs. — Les branchements particuliers conduisent l'eau dans des réservoirs, qui sont munis d'un orifice de trop-

plein par où le liquide s'en va à l'égout lorsqu'il dépasse un certain niveau et menace de se répandre dans les appartements. Si le trop-plein fonctionne fréquemment, il en résulte une perte considérable pour l'entreprise des eaux. Il convient donc de disposer des appareils automatiques qui ferment le robinet d'alimentation lorsque le niveau de l'eau dans le réservoir est suffisamment élevé.

Les figures 6 et 7, de la planche 10, représentent deux appareils de ce genre.

Le premier se compose d'un robinet *g*, posé près de l'extrémité de la conduite; la clef de ce robinet est reliée par une tige en fer à un flotteur *h*, qui suit toutes les variations du niveau de l'eau dans le réservoir *i*; quand le flotteur a atteint une certaine hauteur, le robinet se ferme complétement.

Le second appareil est une soupape fixée à l'extrémité d'un levier du premier genre dont le grand bras se termine par un flotteur; on en comprend à première vue le mécanisme.

5° RÉSERVOIRS

Nous avons montré, au chapitre I, toute l'importance des réservoirs : ils constituent le régulateur, le volant d'une distribution d'eau. A chaque instant, ils emmagasinent la différence entre le volume de liquide amené et le volume consommé ou bien ils comblent le déficit entre l'apport et la consommation.

La consommation est essentiellement variable, l'apport est uniforme; qu'il s'agisse d'un aqueduc de dérivation ou de machines élévatoires, on peut sans doute en régler le fonctionnement de manière à proportionner la production à la consommation; mais on sait qu'il est toujours plus économique de faire marcher les machines à l'allure pour laquelle elles ont été construites, et qu'il vaut mieux faire porter la réduction sur la durée journalière du fonctionnement.

Ces considérations font bien sentir l'utilité, la nécessité des réservoirs, qui sont en outre destinés à parer aux chômages des sources d'alimentation.

Nous avons fait, au chapitre I, la théorie des réservoirs destinés à augmenter le débit momentané des conduites, des orifices alimentés par deux réservoirs, d'une conduite bifurquée alimentant deux réservoirs de niveau différent.

On trouvera dans le cours du volume la description du réservoir cylindrique d'Avallon, la description des réservoirs cylindriques de la porte Guillaume à Dijon, et du réservoir rectangulaire de Montmusard, ainsi que la description du réservoir à deux étages de Ménilmontant pour les eaux de la Dhuis. Nous compléterons ces notions par la description sommaire de quelques autres réservoirs.

Réservoir de Lyon. — La figure 7, de la planche 14, représente la coupe en travers du réservoir du moyen service à Lyon. La capacité de ce réservoir est de 600 mètres cubes. Il se subdivise en deux compartiments indépendants, qui peuvent néanmoins être mis en communication au moyen d'un robinet vanne.

Il est construit en maçonnerie de moellons et couvert par deux voûtes en plein cintre supportées par deux culées et par le mur de division du réservoir.

Le déversoir du trop-plein est à $4^{m},50$ en contre-haut du radier.

Réservoir d'Orléans. — Le réservoir précédent est presque tout entier enfoui

dans le sol, et sa construction ne donne lieu à aucune difficulté. Il n'en est pas de même des réservoirs aériens, surtout lorsqu'on les construit entièrement en maçonnerie.

Les figures 8 et 9 de la planche 14 représentent en coupe et en plan le réservoir d'Orléans construit par M. Mary. Le niveau de l'eau s'y élève à 13 mètres au-dessus du sol environnant.

Le réservoir repose sur un mur extérieur continu et sur cinq murs transversaux qui s'y rattachent à leurs extrémités où ils sont renforcés sur 3m,70. Ces murs et ces contre-forts sont reliés par des voûtes en plein cintre de 3m,10 de diamètre, qui sont extradossées horizontalement pour former le radier du réservoir ; elles ont 0m,60 d'épaisseur à la clef.

Le bassin supérieur, qui contient 5 mètres de profondeur d'eau, est renfermé entre quatre murs d'une épaisseur de 5 mètres à la base et de 0m,60 au sommet dont le parement extérieur a un fruit de 0m,90, tandis que le parement intérieur est décrit d'un arc de 7m,60 de rayon. Il est recouvert de voûtes plates en berceau reposant sur des piliers qui reposent eux-mêmes sur l'extrados horizontal des voûtes inférieures.

La poussée des voûtes est détruite autant que possible par des tirants en fer.

La pression qui s'exerce sur la maçonnerie ne dépasse pas 4kilogr,54 par centimètre carré.

Au niveau supérieur des eaux, on a ménagé un déversoir de trop-plein, calculé de manière à pouvoir débiter, avec une charge de 0m,05 seulement, toute l'eau qui arrive au réservoir.

Réservoir de Dunkerque. — Le réservoir de Dunkerque, construit par M. Pauwels, affecte en plan la forme d'un rectangle de 53 mètres sur 13 mètres ; il contient 2,145 mètres cubes avec une hauteur d'eau de 4 mètres.

Il est divisé en trois compartiments dont les murs de séparation sont profilés de telle sorte qu'un des compartiments puisse être vide pendant que son voisin est plein.

Le réservoir proprement dit est supporté par un système de voûtes d'arête de 1m,85 de portée, reposant sur des piliers de 1m,15, lesquels s'appuient sur un massif de béton de 0m,40 d'épaisseur. Ce système de voûtes forme de grandes caves, très-utiles comme magasin pour le service des eaux.

Le réservoir proprement dit, recouvert par des voûtes en briques de 1m,50 d'ouverture, portées par des poutrelles en tôle reposant elles-mêmes sur des colonnettes en fonte de 3 en 3 mètres. Ces voûtes ont 0m,40 d'épaisseur y compris une chape de 0m,06 d'épaisseur et supportent le massif du cavalier des fortifications.

L'eau peut s'élever jusqu'à la naissance des voûtes en briques, c'est-à-dire jusqu'à une hauteur de 4 mètres.

Réservoir aérien en tôle. — Les réservoirs en maçonnerie deviennent très-coûteux lorsqu'ils s'élèvent à une certaine hauteur au-dessus du sol ; les poussées latérales dues à la hauteur de l'eau dans l'étage supérieur se transmettent jusqu'au sol et agissent quelquefois avec un bras de levier considérable, de sorte qu'elles exigent l'emploi de gros massifs de maçonnerie.

Il est beaucoup plus économique de recourir à de grandes cuves métalliques, à section circulaire ou rectangulaire, qui par elles-mêmes résistent aux poussées et n'agissent que par leur poids sur les murs qui les supportent. L'influence de la hauteur ne se fait pas trop sentir alors sur le prix d'établissement.

Avec ces cuves métalliques, il est facile d'arriver à une étanchéité parfaite,

chose très-difficile, sinon impossible, avec des réservoirs en maçonnerie reposant sur des voûtes.

Il est vrai que les réservoirs métalliques exigent un entretien constant; cependant cet entretien n'est ni bien coûteux, ni bien difficile, si l'on a soin de laisser apparentes et d'un accès facile toutes les faces du métal.

A cet effet, ces faces doivent être à une certaine distance des parois extérieures de l'édifice, s'il en existe, et il convient de poser les cuves sur un plancher à claire-voie.

L'inconvénient des réservoirs métalliques est leur sensibilité à la température extérieure ; mais il est bien facile de remédier à cela ; il suffit d'entourer la cuve d'un mur ordinaire en maçonnerie, laissant entre elle et lui un certain espace vide et supportant une terrasse qui recouvre la cuve. Celle-ci se trouve ainsi à l'abri de la chaleur et des gelées. Si les gelées étaient à craindre, on pourrait en hiver garnir de paille le vide ménagé entre le mur et la cuve.

La cuve métallique repose sur un plancher formé de poutrelles en double T dont les bouts s'appuient sur deux murs en maçonnerie et qu'on soutient dans l'intervalle par des colonnes en fonte, si la portée l'exige ; le rez-de-chaussée du réservoir est complétement fermé et on l'utilise comme magasin.

On arrive, avec la tôle, à construire des réservoirs qui ne coûtent pas plus de 25 francs par mètre cube de capacité.

La forme circulaire est celle qui contient le plus grand volume sous la moindre surface; mais elle est d'exécution plus difficile que la forme rectangulaire, et, généralement, il y aura avantage à préférer cette dernière.

La forme circulaire ne peut se déformer; l'épaisseur de la tôle aux diverses hauteurs se calcule par la formule de la résistance des tuyaux, que nous avons donnée plus haut. Il faut se préoccuper aussi de l'effort tranchant vertical qui tend à séparer le fond du réservoir de ses parois latérales, à moins que le fond ne soit supporté par des poutrelles qui fractionnent la surface.

La forme rectangulaire est moins facile à calculer: on peut disposer à l'intérieur, au tiers de la hauteur de l'eau à partir du fond, des tirants horizontaux capables de résister à la poussée qui tend à écarter les faces opposées, et ces tirants permettent alors de réduire l'épaisseur des parois. Si l'on supprime ces tirants, il conviendra toujours d'entretoiser les faces opposées à leur partie supérieure, et on calculera chaque paroi latérale comme une poutre verticale fixée à ses deux extrémités et soumise à des efforts horizontaux proportionnels à la profondeur de l'eau; on devra s'assurer en outre que les efforts tranchants qui se produisent suivant les lignes d'intersection horizontales et verticales du fond et de toutes les faces trouvent une résistance suffisante.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur ces calculs dont nous avons donné tous les éléments dans notre *Traité des ponts métalliques*.

Résistance des réservoirs en maçonnerie. — De même, dans notre *Traité des ponts en maçonnerie,* aux pages 108 et suivantes, nous avons donné les formules et les méthodes graphiques permettant de calculer les dimensions des murs qui ont à soutenir des terres ou de l'eau.

Nous rappellerons sommairement les principes de ces calculs.

Soit un mur dont *abcd* est la section, figure 10, planche 14; considérons ce mur sur 1 mètre de longueur, il reçoit de l'eau une poussée horizontale Q appliquée au tiers de la hauteur *h*; cette poussée est combattue par le poids de la maçonnerie P, et la résultante R de ces deux forces coupe la base *cd* en un point *m*.

Soit o le milieu de la base cd : si le rapport $\left(\frac{om}{od}\right)$ est moindre que $\frac{1}{5}$, la pression maxima p par unité de surface que la maçonnerie supporte, est donnée par l'équation

$$p=\frac{P}{S}(1+3n)$$

dans laquelle P est le poids de la tranche de mur considérée, S la surface de la base de cette tranche et n le rapport $\left(\frac{om}{od}\right)$.

Si le rapport n est supérieur à $\frac{1}{5}$, la pression maxima par unité de surface est donnée par la formule:

$$p=\frac{P}{S}\frac{4}{3(1-n)}$$

Le point m est le centre de pression dans la base cd; si nous considérons la section ef et que nous construisions la résultante de la poussée du liquide supérieur et du poids de maçonnerie qui surmonte ef, cette résultante coupe ef en un point qui appartient à ce que nous avons appelé en résistance la courbe des pressions.

La courbe des pressions est donc facile à construire ; en aucun point, elle ne doit sortir du massif de maçonnerie et on doit s'attacher à profiler le massif de telle sorte, qu'elle passe toujours au milieu des sections, car alors le rapport n est nul et dans chaque section horizontale la pression se trouve uniformément répartie.

Nous aurons lieu de revenir ultérieurement sur la détermination du profil des murs des grands réservoirs ; cette détermination n'a pas grande importance dans les réservoirs ordinaires de distributions d'eau.

Il y a avantage, au point de vue de la résistance, à profiler le mur en contact avec l'eau suivant une courbe parabolique ou suivant une série de redans, comme le montre la figure 11, planche 14. En effet, lorsqu'on cherche la résultante de la force de renversement Q et de la force de stabilité P, celle-ci se compose non seulement du poids du mur en maçonnerie, mais encore du poids d'un prisme de liquide ayant pour base la surface $hefgak$.

Mais, nous le répétons, nous n'insistons pas sur ces calculs qui seront plus amplement développés lorsque nous traiterons des canaux.

Généralités sur les réservoirs. — Il est évident que les réservoirs établis en déblai sont les meilleurs, les plus faciles à construire et les plus économiques. Ils doivent toujours être revêtus en maçonnerie; sans quoi il y aurait des filtrations et des végétations se développeraient à l'intérieur.

Toutes les fois qu'on trouvera un mamelon, un côteau dominant toute une ville, c'est là qu'il faudra établir son réservoir et on le fera en déblai.

Lorsqu'on établit une distribution d'eau de source, il convient de recourir à des réservoirs voûtés afin de conserver une des principales qualités de l'eau, la fraîcheur. S'il s'agit d'eau de rivière, il peut n'être pas indispensable de recouvrir les réservoirs, mais cette précaution est toujours préférable.

Dans tous les cas, il convient de ménager des cheminées d'aérage ; le renou-

vellement de l'air, ainsi que nous l'avons dit en parlant des citernes, empêche la putréfaction.

Les réservoirs aériens ne doivent guère être construits en maçonnerie que si leur hauteur ne dépasse pas 5 mètres au-dessus du sol ; au delà il sera généralement préférable de recourir aux cuves métalliques enveloppées dans un édifice en maçonnerie.

Du reste dans chaque cas on fera bien de dresser des projets comparatifs, avec des surfaces et des hauteurs d'eau variables, afin de rechercher le minimum de dépense.

CHAPITRE VII

ÉGOUTS

Les égouts sont la contre-partie des distributions d'eau. Si l'hygiène publique et privée exige qu'une eau pure et limpide soit mise à la portée de tous et vienne à chaque instant dissoudre ou diluer les germes d'infection, elle veut aussi que tous les produits impurs soient rapidement entraînés loin des villes.

Les distributions d'eau et les égouts constituent le système complet de circulation dont le fonctionnement ininterrompu est nécessaire à la santé des villes, comme la circulation du sang est nécessaire à la vie des animaux.

Rôle des égouts. — Les égouts, disent les Anglais, doivent servir à évacuer tout ce qui est susceptible d'être entraîné par les eaux.

L'application absolue de ce principe n'est encore réalisée qu'en quelques pays; en France, les fosses d'aisances subsistent presque partout, et les matières fécales sont enlevées par les procédés primitifs que tout le monde connaît et qui sont appelés à disparaître dans l'avenir.

Les égouts ont encore un rôle secondaire, susceptible de prendre dans les grandes villes une importante extension: ce sont des voies de communication souterraines. A ce titre, elles reçoivent les conduites d'eau et elles arriveront sans doute à recevoir les conduites de gaz; elles devraient servir en outre, comme M. Haussmann en avait le projet, au transport par wagons de toutes les immondices que viennent aujourd'hui ramasser dans nos rues de lourds tombereaux, encombrants et malpropres.

Évacuation totale par les égouts. — Dans la plupart des villes les égouts ne reçoivent que les eaux pluviales et les eaux qui ont servi à l'arrosage de la voie publique.

Les bouches d'arrosage sont placées en tous les sommets, et chacune d'elles fournit l'eau aux caniveaux de droite et de gauche; ces caniveaux recueillent aussi l'égout des maisons qui descend par des gouttières et des gargouilles sous trottoirs.

A tous les points bas des caniveaux on trouve une bouche en pierre ou en fonte, ou bien encore une grille; les eaux s'y engouffrent et, par un branchement, se rendent à l'égout.

Les égouts secondaires, tracés sur les versants des ondulations du sol, aboutissent aux thalwegs de ces ondulations et portent leur tribut à des égouts plus considérables; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive au grand égout collecteur qui reçoit toutes les déjections de la ville et les emporte au loin.

En Angleterre, avons-nous dit, le principe est que les égouts recueillent non-seulement les eaux pluviales et les eaux d'arrosage, mais encore les eaux ménagères et les matières fécales.

Les eaux ménagères et les eaux industrielles ne sont vraiment dangereuses que lorsqu'elles sont acides ou ammoniacales ; lorsqu'elles sont acides, elles déterminent quelquefois de vives réactions et peuvent attaquer les maçonneries ; lorsqu'elles sont ammoniacales, elles infectent les égouts et empêchent les ouvriers d'y séjourner. — Ces deux espèces d'eaux doivent donc faire l'objet d'un traitement spécial avant d'être envoyées à l'égout.

Les matières fécales sont inoffensives lorsqu'elles sont diluées dans une quantité suffisante d'eau et ne séjournent pas dans les conduits souterrains.

En ce qui touche les eaux ménagères, on ne fait plus difficulté en France de les admettre à l'égout ; un décret de 1852, qui n'a pas été rigoureusement exécuté, ordonnait même que, dans un délai de dix ans, les eaux pluviales et ménagères de toutes les maisons de Paris seraient envoyées à l'égout.

En ce qui touche les matières fécales, les objections subsistent : on craint l'infection des égouts ; on redoute de ne plus trouver d'égouttiers, et on ne veut pas perdre un engrais précieux pour l'agriculture.

Les matières fécales, diluées dans une masse d'eau, perdent leur aspect repoussant et ne dégagent d'odeur sensible que si les eaux restent stagnantes pendant un jour ou deux ; les deux premières objections ne sont donc pas fondées, et la troisième ne l'est plus depuis le succès de l'utilisation des eaux d'égout en agriculture.

Pente à donner aux égouts. — La pente minima à donner aux égouts doit être telle, que l'eau maintienne en suspension les substances diluées et ne les abandonne point en formant des dépôts qui nécessiteraient de fréquents et dispendieux curages.

Cette pente doit encore être suffisante pour imprimer au courant une vitesse telle, que le séjour des eaux corrompues dans les galeries ne dépasse pas une journée ; si ce terme est dépassé, les émanations putrides ne tardent pas à se développer.

La pente dépend en outre du volume de liquide qu'il s'agit de débiter, et, sous ce rapport, elle est liée à la section. — L'égout doit débiter non-seulement le produit constant de l'arrosage et des eaux vannes, mais encore le produit des pluies d'orage qui, en fort peu de temps, fournissent un cube considérable. — Si l'on dispose d'une forte pente, on réduira la section et inversement.

Les enquêtes anglaises ont montré qu'avec une pente de 0,0002, c'est-à-dire de $0^{m},20$ par kilomètre, le courant prenait une vitesse de $0^{m},65$ par seconde et conservait en suspension toutes les matières diluées. — La distance parcourue par le courant atteignait 57 kilomètres en vingt-quatre heures.

La pente de 20 centimètres par kilomètre est donc un minimum qu'il ne faut point dépasser.

Conditions de construction. — Les égouts doivent être imperméables ; les infiltrations qui s'échappent des anciens égouts mal construits imprègnent le sol avoisinant, quelquefois même se répandent dans les caves ; elles sont des plus dangereuses pour la salubrité publique.

La maçonnerie des égouts doit être peu altérable aux acides : la meulière et les matériaux siliceux seront donc bien préférables aux matériaux calcaires.

Les parois intérieures doivent être dures pour ne pas être détériorées par les

corps flottants; il faut qu'elles soient lisses pour ne point faire obstacle à l'écoulement des eaux.

Le profil intérieur ne doit présenter aucun angle rentrant; tous les raccords doivent se faire par des courbes à grand rayon. De la sorte, la section ne présente aucun espace nuisible dans lequel l'eau reste stagnante, et les émanations ne sont pas à craindre.

La forme circulaire est celle qui donne la moindre résistance à l'écoulement; en principe, c'est donc elle qu'il faut préférer. Mais elle ne permettrait point de circuler facilement dans les petits égouts, et elle se transforme alors en une courbe ovoïde ou ellipse à grand axe vertical; dans les grands égouts, l'installation intérieure et la circulation n'y seraient point très-commodes, et la section circulaire occuperait trop de hauteur: elle se transforme alors en une courbe aplatie, ellipse à grand axe horizontal.

Moyens de combattre les exhalaisons. — Lorsqu'on passe devant une bouche d'égout, on reconnaît qu'il s'en échappe, dans certaines villes, une odeur putride, désagréable et nuisible. — Cette odeur ne se développe que dans les égouts mal disposés qui ne reçoivent point un afflux d'eau assez considérable.

Dans les égouts modernes, les matières convenablement diluées et ne séjournant guère ne répandent pas d'odeurs; les bouches d'égout doivent rester ouvertes, ainsi que toutes les portes, afin de déterminer des courants d'air intérieurs qui assainissent l'égout et en rendent le séjour inoffensif; ces courants sont encore activés par le mouvement de l'eau. Tous ceux qui ont visité les égouts de Paris ont reconnu que l'odeur y était parfaitement tolérable et que les courants d'air devenaient même quelquefois gênants.

Cependant, lorsque les bouches d'égout dégagent des miasmes, il faut s'opposer à ce dégagement. A cet effet, les bouches sont fermées par des trappes mobiles, ou bien ne communiquent avec l'égout qu'au moyen de siphons ou de fermetures hydrauliques analogues aux appareils que nous décrirons tout à l'heure. — Alors l'égout ne se trouve plus ventilé; il ne faut y pénétrer que lorsqu'il a été soumis à des chasses d'eau assez violentes pour en rendre le séjour inoffensif.

Même avec les anciens égouts, si l'on a soin de faire suivre les bouches de branchements assez longs, on arrive à atténuer notablement les dégagements d'odeur sur la voie publique.

Il n'en est pas de même pour les conduits qui amènent à l'égout les eaux ménagères et les matières fécales; ces conduits débouchent soit dans les éviers des cuisines, soit dans les water-closets; ils dégagent une odeur infecte lorsqu'ils communiquent librement avec l'égout.

Autrefois l'orifice inférieur de ces conduits était fermé par une soupape à bascule et à contre-poids; lorsque la pression du liquide accumulé venait à l'emporter sur le contre-poids, la soupape basculait et l'émission s'opérait ainsi d'une manière intermittente. Seulement, la fermeture n'était jamais hermétique et on n'évitait point les bouffées méphitiques.

La fermeture hydraulique, figure 48, est bien préférable; les eaux vannes tombent dans le réservoir *a* qui communique avec le réservoir *b*, dont il est séparé par une cloison verticale pendante qui descend jusqu'au-dessous du niveau du conduit d'évacuation, qui se rend à l'égout; l'eau ne s'abaisse donc jamais dans le réservoir *a* au-dessous de la cloison verticale, et la communication directe entre le conduit de la maison et l'égout ne s'établit jamais.

On obtient le même résultat avec le siphon renversé de la figure 49; mais les résidus solides peuvent s'accumuler dans le coude et obstruer le passage; il

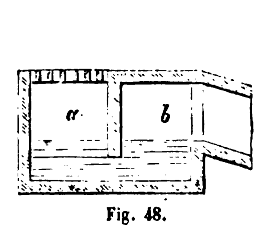
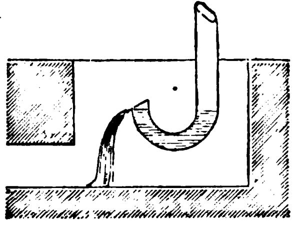


Fig. 48.


Fig. 49.

faut alors recourir à une chasse d'eau assez violente. Mieux vaut éviter cette sujétion et employer la fermeture hydraulique à deux compartiments.

DESCRIPTION SOMMAIRE DES ÉGOUTS DE PARIS

Nous n'entrerons point dans les détails de construction des égouts; ces détails se trouvent dans d'autres parties de notre ouvrage. Les égouts s'exécutent quelquefois en souterrain, mais, le plus souvent, à ciel ouvert dans des fouilles étrésillonnées; nous avons donné de nombreux exemples de ce genre de travaux.

Nous nous bornerons ici à une description sommaire des égouts de Paris, dont les types sont partout applicables.

C'est en 1854 que fut projeté le réseau complet des égouts de Paris, qui se termine par deux grands collecteurs débouchant en Seine, à 20 kilomètres à l'aval de Paris, en suivant le cours du fleuve.

Le collecteur de la rive droite a 4,600 mètres de long; sa largeur est de $5^m,60$ aux naissances, sa hauteur sous clef $4^m,40$; il présente une cuvette centrale de $3^m,50$ de large et de $1^m,35$ de profondeur, flanquée de deux banquettes. Il forme comme le prolongement du collecteur des quais de la rive droite et reçoit le produit des collecteurs secondaires, tels que le collecteur des coteaux et le collecteur de la rue de Rivoli.

Le collecteur de la rive gauche part de la Bièvre et suit les quais jusqu'au pont de l'Alma : là, il traverse la Seine en siphon par deux tuyaux en tôle immergés d'un mètre de diamètre chacun.

De là il se dirige vers Asnières où il dégorge en Seine au même point que le collecteur de la rive droite.

A l'autre extrémité de l'échelle, on trouve le petit égout de branchement, dont la hauteur est de $2^m,30$ sous clef et la largeur de $1^m,30$ aux naissances; ce dernier type permet encore la libre circulation des ouvriers; il peut facilement être visité et nettoyé.

Entre le grand collecteur et le branchement, on trouve dix types; les uns ont une seule banquette, les autres en ont deux et les arêtes de ces banquettes sont garnies de cornières, servant de rails aux wagonnets de service et aux wagons-vannes, chargés d'opérer un curage continu, wagons que nous avons décrits à l'article « DRAGUAGES » dans le *Traité de l'exécution des travaux*.

La maçonnerie des égouts est en meulière et mortier de chaux hydraulique ou de ciment ; le mortier de ciment est avantageux, par sa solidité et sa prise rapide. La section intérieure des égouts est revêtue d'un enduit lisse en mortier de ciment, qui donne d'excellents resultats.

Les figures 1 à 5 de la planche 15 représentent divers types des égouts de Paris.

La figure 4 donné la coupe en travers du grand collecteur, qui conduit à Asnières les eaux de la rive droite et celles de la rive gauche. C'est le plus grand ouvrage de ce genre ; ses dimensions sont supérieures à celles de la fameuse Cloaca maxima de Rome. Le curage de ce collecteur s'effectue au moyen d'un bateau-vanne semblable au wagon-vanne, que nous avons décrit ; à l'avant de ce bateau est une vanne, à charnière horizontale, ayant la forme générale de la cuvette ; elle retient les eaux d'amont, et ces eaux s'échappent avec violence entre les bords de la vanne et les parois de la cuvette, elles entraînent les dépôts et dégagent le chenal, de sorte que le bateau descend lentement en effectuant un curage automatique. Pour le ramener à son point de départ, on relève la vanne et on le tire à bras d'hommes.

La figure 2 représente la coupe en travers de l'égout du boulevard de Sébastopol, qui reçoit deux conduites d'eau : l'une de $1^m,10$, l'autre de $0^m,80$ de diamètre. Il conduit à la Seine les eaux des pluies d'orage de la moitié des quartiers de la rive droite.

La figure 5 représente le grand égout de la rue de Rivoli, qui débouche dans le collecteur d'Asnières.

La figure 1 représente le petit égout de branchement et la figure 3 l'égout du boulevard Saint-Germain, qui débouche dans le collecteur de la rive gauche.

Sur la figure 6, on voit le type n° 4 de la ville de Lyon ; les branchements particuliers se composent à Lyon de tuyaux cylindriques en poterie.

Le prix du petit égout de branchement est de 100 francs le mètre courant.

ÉPURATION DES EAUX D'ÉGOUT

Les collecteurs des grandes villes roulent des eaux chargées de matières putrescibles qui ne tardent pas à se corrompre; pour assainir les villes, on est conduit à infecter les campagnes suburbaines. Il est donc nécessaire de purifier les eaux d'égout et de leur enlever toutes les matières organiques, dont elles sont chargées.

Ce problème, étudié depuis plusieurs années, semble avoir trouvé une solution heureuse dans l'emploi agricole des eaux d'égout.

On trouve des renseignements sur la question dans les ouvrages ci-après :

1° Note sur l'épuration des eaux d'égout de Reims, *Annales des Ponts et Chaussées*, février 1869 ;

2° Épuration des eaux d'égout, par MM. Mille et Durand-Claye, *Annales des Ponts et Chaussées*, novembre 1869;

3° Note insérée aux *Annales des Ponts et Chaussées*, de février 1872;

4° Étude de M. l'ingénieur Durand-Claye, *Annales des Ponts et Chaussées*, février 1873 ;

5° Étude sur les eaux d'égout de Reims, par M. Gariel, *Annales des Ponts et Chaussées*, juillet 1873.

6° Situation de la question des eaux d'égout, par M. Durand-Claye, *Annales des Ponts et Chaussées*, mars 1874 ;

7° Principes de l'assainissement des villes, par M. de Freycinet, 1 volume avec atlas.

Un décret du 22 août 1874 a institué une Commission, chargée de proposer les mesures à prendre pour remédier à l'infection de la Seine, aux abords de Paris.

Le remarquable rapport de cette Commission a été inséré au *Journal officiel* du 10 avril 1875; il élucide complétement la question. Aussi croyons-nous utile de le reproduire ici.

MINISTÈRE DES TRAVAUX PUBLICS

RAPPORT DE LA COMMISSION CHARGÉE DE PROPOSER LES MESURES A PRENDRE POUR REMÉDIER A L'INFECTION DE LA SEINE AUX ENVIRONS DE PARIS

INTRODUCTION

Nomination de la Commission

Par décret en date du 22 août 1874, M. le ministre des travaux publics a institué une commission spéciale « chargée de proposer les mesures à prendre pour remédier à l'infection des eaux de la Seine aux abords de Paris. »

Sa composition

Dans cette commission étaient représentés à la fois le département des travaux publics, les services placés dans les attributions de M. le préfet de la Seine, et les services placés dans les attributions de M. le préfet de police [1].

[1] La commission était composée de :

Pour représenter le département des travaux publics.

MM. Kleitz, inspecteur général des ponts et chaussées, président.
Chatoney, inspecteur général des ponts et chaussées.
Krantz, ingénieur en chef, chargé du service de la 3e section de la Seine.

Pour représenter les services placés dans les attributions de M. le Préfet de la Seine.

MM. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des eaux et égouts de Paris.
Alphand, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des travaux de Paris.
Mille, inspecteur général des ponts et chaussées.
Vaudrey, ingénieur en chef, chargé du service de la 2e section de la Seine.
Callon, conseiller municipal de Paris.
Dr Depaul, conseiller municipal de Paris.

Pour représenter les services placés dans les attributions de M. le Préfet de Police.

M. Chevalier, membre du conseil de salubrité.
Boudet, membre du conseil de salubrité.

La commission s'est adjoint comme secrétaire et a ensuite désigné comme rapporteur M. Durand-Claye, ingénieur des ponts et chaussées.

Objet du Rapport

La commission vient aujourd'hui rendre compte de la mission qui lui a été confiée.

Historique sommaire

L'administration des travaux publics s'est déjà préoccupée plus d'une fois de la corruption des eaux de la Seine aux abords de Paris. En vertu d'une décision ministérielle du 23 octobre 1869, des conférences ont eu lieu entre les ingénieurs de la navigation et ceux du service municipal de la ville de Paris. Ces derniers produisirent en outre, en 1870, un avant-projet général pour l'utilisation et l'épuration des eaux des égouts. Les conclusions des ingénieurs réunis en conférence, ainsi que les dispositions prévues à l'avant-projet, firent l'objet de deux rapports détaillés de la part de M. l'inspecteur général Kleitz, en date des 2 mars et 15 juillet 1870. Le conseil général des ponts et chaussées discuta les deux rapports dans sa séance du 21 juillet 1870. Par une dépêche du 30 juillet de la même année, M. le ministre des travaux publics transmit, avec son approbation, l'avis du conseil général des ponts et chaussées à M. le préfet de la Seine. De cet avis il résultait :

1° Que la ville de Paris était tenue de remédier aux inconvénients que créait en Seine l'écoulement des eaux des collecteurs de Clichy et de Saint-Denis;

2° Que, dans ce but, la ville de Paris devait, d'une part, assurer un service satisfaisant des draguages; de l'autre, continuer, en les développant, les expériences entreprises à Gennevilliers en vue de la désinfection des eaux d'égout par leur application à l'irrigation et par l'épuration au sulfate d'alumine; l'avant-projet, dressé en 1870 par les ingénieurs du service municipal, était signalé à M. le préfet de la Seine comme pouvant remplir ce dernier but.

Quelques jours après la décision ministérielle précitée, les événements de la guerre venaient apporter un trouble profond dans la banlieue de Paris. Après la lutte contre l'étranger et contre l'insurrection, l'administration municipale de la ville de Paris fut réorganisée sur de nouvelles bases; les essais d'utilisation et d'épuration des eaux d'égout furent repris et considérablement développés; d'autre part, les inconvénients résultant du déversement des eaux d'égout en Seine allèrent chaque année en s'accusant davantage.

La commission s'est donc trouvée en présence de faits plus nombreux et plus nettement caractérisés qu'en 1870; elle a cherché, dans plusieurs séances et tournées sur le terrain, à remplir de son mieux la tâche qui lui incombait et à répondre aux intentions de M. le ministre des travaux publics en examinant la question sous toutes ses faces, suivant la recommandation expresse de M. le ministre (lettre du 21 juillet 1874 à M. le préfet de la Seine).

Division du Rapport

Le travail de la commission se divisait naturellement en deux parties distinctes :

1° Constatation de l'infection de la Seine aux abords de Paris et recherche des causes de cette infection;

2° Examen et choix des mesures à prendre pour remédier à cette infection.

Ce sont les deux grandes divisions de ce rapport.

PREMIÈRE PARTIE

CONSTATATION DE L'INFECTION DE LA SEINE AUX ABORDS DE PARIS. CAUSE DE CETTE INFECTION

Phénomènes qui caractérisent l'infection de la Seine

Les phénomènes qui caractérisent l'infection de la Seine sont de deux ordres : les uns, extérieurs, de l'ordre physique ou physiologique, frappent facilement l'attention de toute personne qui suit les bords du fleuve; les autres, plus scientifiques, exigent le concours de la chimie pour acquérir toute leur valeur; ils définissent d'une manière précise les faits de corruption et permettent d'en suivre le développement et la propagation.

Caractères extérieurs de l'infection de la Seine

Pour apprécier les caractères extérieurs de l'infection de la Seine, la commission a parcouru, le 11 octobre, la partie du fleuve la plus gravement atteinte, c'est-à-dire celle qui s'étend entre Clichy et Rueil : plusieurs de ses membres ont complété cette tournée en communiquant les observations qu'ils avaient pu noter dans les parties du fleuve situées en amont ou en aval de la section précitée. De ces diverses constatations résultent les faits suivants :

En amont de Paris, dans la traversée de la capitale ainsi qu'entre les fortifications et Asnières, la Seine présente un aspect satisfaisant, au moins à la simple inspection superficielle. Le progrès accompli par la grande œuvre de la canalisation de Paris et des collecteurs se manifeste d'une manière évidente. En un certain nombre de points, répartis sur les deux rives, des filets d'eaux impures sortent de divers établissements industriels ou des égouts de la banlieue et même des égouts de Paris non encore réunis aux collecteurs, mais ces filets sont rapidement noyés dans la masse du fleuve. Les poissons vivent dans toute la largeur de la rivière; des végétaux d'ordre élevé poussent sur les berges; le fond de la Seine est formé de sables blancs. Pendant les chaleurs et les sécheresses de la saison dernière, tout le monde a pu constater l'état relativement satisfaisant de la Seine dans tout ce parcours.

En aval du pont d'Asnières la situation change brusquement. Sur la rive droite de la Seine se trouve le débouché du grand collecteur de Clichy. Un courant considérable d'eau noirâtre sort de ce collecteur et s'épanouit en Seine en formant une courbe parabolique. Cette courbe occupe une étendue variable dans le courant : en temps ordinaire, elle tient environ la moitié de la largeur du fleuve; en temps de pluie d'orage, elle se rapproche de la rive gauche. Cette eau est d'un aspect répugnant; elle est chargée de débris organiques de toute sorte : légumes, bouchons, poils, cheveux, cadavres d'animaux domestiques, etc... Elle est ordinairement recouverte d'une couche de matière graisseuse qui, suivant la direction du vent, vient s'accumuler sur une rive ou sur l'autre. Une vase grise, mélangée de débris organiques, s'accumule le long de la rive droite et forme des bancs d'atterrissements qui, à certaines périodes de l'année, présentent des saillies considérables hors de l'eau et ne disparaissent que grâce à de coûteux draguages. Cette vase descend jusqu'au thalweg du fleuve; elle est le siége d'une fermentation active qui se traduit par des bulles innombrables de gaz venant crever à la surface de l'eau; pendant une grande partie de l'année, et principalement au moment des fortes chaleurs, ces bulles atteignent des dimensions considérables (1 mètre à 1^m,50 de diamètre). Elles entraînent la vase en s'en dégageant et amènent à la surface des matières noires et infectes qui cheminent ensuite à découvert avec le courant. Le passage d'un bateau soulève des flots d'écume et crée une véritable ébullition qui dure quelques minutes dans le sillage.

Tous ces phénomènes se produisaient en 1870 sur la seule rive droite du fleuve, et l'infection ne se manifestait d'une manière évidente que sur le premier des trois bras que la Seine forme à Clichy, entre les rives et les îles Vaillard et Robinson. Aujourd'hui le second bras est complétement envahi et l'altération se montre sur la rive droite du dernier bras. Aucun être vivant, aucun poisson, aucune herbe verte ne se rencontre dans le bras droit ; dans le bras central, le poisson commence à apparaître et se retrouve dans le bras gauche. Les jours de grande pluie d'orage, lorsque le courant des eaux d'égout envahit la totalité de la largeur de la Seine, les poissons peuvent être accidentellement détruits, même dans les parages qu'ils fréquentent habituellement, par suite de l'infection générale et temporaire du fleuve. Le bras central présente une végétation moyenne; les herbes sont extrêmement fortes et vivaces sur le bras gauche. Au delà des îles de Clichy et jusqu'à l'île Saint-Denis, l'altération continue en s'accusant un peu moins fortement à la surface ; l'eau conserve une couleur noirâtre ; la rive droite est toujours bordée d'écumes et de graisses ; l'altération semble s'étendre sur la largeur complète de la rivière ; la berge gauche est garnie de débris végétaux, de bouchons, etc., et d'une couche mince de vase grisâtre.

A Saint-Ouen commence l'île Saint-Denis, qui s'étend jusqu'à 2 kilomètres d'Argenteuil et sépare le fleuve en deux bras distincts : le bras gauche, alimenté par la partie la moins altérée du fleuve et ne recevant du reste aucun nouvel affluent d'eau infecte, présente des eaux qui semblent d'une pureté très-suffisante. Le bras droit, au contraire, alimenté par le courant même du collecteur de Clichy, qui a suivi spécialement la rive droite du fleuve, conserve devant Saint-Ouen et au delà les caractères d'infection constatés à Clichy; ceux-ci vont cependant en diminuant d'intensité apparente jusqu'au pont suspendu de Saint-Denis; c'est ainsi que la vase, dont la répartition sur le fond du fleuve a été faite, à la demande de la commission, par les ingénieurs de la navigation de la Seine, atteint à Clichy des épaisseurs de 2 à 3 mètres, et n'a plus que 65 centimètres d'épaisseur à Saint-Ouen. Aux premières maisons de Saint-Denis, des usines commencent à amener une recrudescence d'infection par un assez grand nombre de déjections industrielles. Mais leur action est peu de chose à côté de celle du collecteur départemental qui débouche à quelques mètres en aval du pont suspendu. Cet égout vomit une eau absolument noire et fétide, dont l'odeur ammoniacale est des plus prononcées. Cette eau envahit bientôt la largeur complète du bras. Des écumes flottent sur toute la surface; des bulles de gaz se dégagent de tous côtés. Cet état se continue, avec une intensité à peu près constante, jusqu'en face le village d'Épinay. Le fond du fleuve est, dans tout ce parcours, garni d'une vase noire, fétide, gluante, peuplée de vers rougeâtres qui ne se trouvent que dans les eaux de vidange les plus infectes. Périodiquement cette vase émerge au voisinage de la bouche du collecteur et doit être extraite par draguage. — Notons que la rivière du Croult, qui débouche en Seine, entre Saint-Denis et Épinay, vient ajouter un assez notable contingent d'eaux industrielles à l'afflux infect du collecteur. D'Épinay à Argenteuil, une amélioration apparente se manifeste, spécialement après la réunion des deux bras, à l'extrémité de l'île Saint-Denis. L'eau, encore foncée de couleur, n'offre plus que de rares débris flottants ; la vase a à peu près disparu : le poisson réapparaît en temps normal. D'Argenteuil au barrage de Bezons, la Seine présente un aspect acceptable. Mais au niveau du barrage, dans le bras gauche formé par l'île du Chiard et ses annexes, une odeur très-marquée se fait de nouveau sentir; les eaux impures semblent rejetées par le barrage sur la rive gauche. La vase noirâtre réapparaît sur toute la largeur du bras avec une épaisseur de 70 centimètres environ. Bientôt l'odeur disparaît; une végétation des plus abondantes garnit les deux rives et encombre même en partie le cours du fleuve par de larges plaques de lentilles d'eau. A Marly, les bajoyers de l'écluse sont couverts d'un dépôt noir et fétide, des écumes se voient le long du barrage et des appareils annexes. L'eau conserve toujours une teinte foncée qu'elle manifeste également dans le bras droit qui passe devant Chatou. Au delà de Marly, les deux bras se réunissent de nouveau. L'intensité de coloration du fleuve diminue graduellement. L'eau est encore trouble et d'un goût peu agréable à Saint-Germain et à Maisons-Laffite. Au delà, vers la Frette et Conflans, et spécialement après le confluent de l'Oise, la Seine a repris en appa-

rence un état sensiblement analogue à celui qu'elle offrait en amont des collecteurs. A Meulan, toute trace extérieure d'infection a disparu.

Caractères chimiques de l'infection de la Seine. Azote et oxygène

Cette simple description de l'aspect que présente actuellement la Seine aux abords de Paris suffit sans doute pour indiquer la gravité de la situation. Mais la commission a cru devoir ajouter à la constatation des faits extérieurs quelques traits empruntés à des recherches plus scientifiques. Elle a donc puisé les renseignements qui vont suivre à des sources autorisées, parmi lesquelles elle doit citer les analyses dues au laboratoire de l'École des ponts et chaussées, et les recherches sur les gaz dissous faites par MM. Boudet, membre du conseil de salubrité, et Gérardin, inspecteur des établissements insalubres de l'arrondissement de Saint-Denis, d'après la méthode dont le principe est dû à M. Schutzenberger, directeur du laboratoire de la Sorbonne[1].

Au point de vue chimique, les eaux impures qui se déversent en Seine produisent deux effets distincts : les matières *minérales* toutes formées, qu'elles contiennent à l'état de suspension ou de dissolution, encombrent le lit du fleuve et altèrent sa composition normale par simple mélange ; l'enlèvement mécanique des depôts et la seule dilution par le courant des substances dissoutes suffiraient, à la rigueur, pour faire disparaître cette altération. Mais lorsque les eaux affluentes contiennent des matières *organiques*, animales ou végétales, lorsqu'en même temps la vitesse de circulation est peu considérable, comme en Seine, le fleuve devient lui-même le siége de décompositions multiples qui altèrent profondément ses eaux et leur donnent sur un long parcours un caractère d'infection spéciale qui ne saurait être négligé au point de vue de la salubrité publique. Les matières organiques se transforment en effet dans le fleuve même, en acide carbonique, eau, carbures d'hydrogène, ammoniaque, acide sulfhydrique et substances minérales diverses. Cette transformation implique toujours une absorption d'oxygène emprunté au gaz dissous dans l'eau, et une production de corps minéraux azotés. Tant que les matières organiques azotées sont abondantes, l'eau est absolument viciée, susceptible de fermentation, impropre à un usage quelconque, fût-ce même à l'arrosage des voies publiques. Lorsque la fermentation est achevée, lorsque les matières organiques sont toutes passées à l'état de matières minérales, inoffensives en elles-mêmes, les eaux présentent à la fois une diminution dans l'oxygène dissous et une disparition des matières organiques azotées, remplacées par des matières minérales azotées, par l'ammoniaque. Les eaux deviennent alors propres à la plupart des usages courants; elles peuvent rester quelque temps pauvres en oxygène; mais l'absence d'oxygène est une conséquence et non un caractère parallèle à la fermentation; une simple action mécanique, telle que le mouvement dû au courant ou aux chutes des barrages, peut ramener progressivement les eaux à leur état normal et les rendre enfin réellement potables.

Pour apprécier l'état d'infection du fleuve, la commission a donc cherché la quantité de matières azotées organiques non encore transformées en ammoniaque que les eaux pouvaient renfermer en divers points; cette dose spécifiait la pollution vraie du fleuve, en

[1] Au mois de juin 1874 le conseil de salubrité, saisi par M. le préfet de Police de plaintes très vives de la part des riverains de la Seine, au sujet de l'altération de ses eaux par les égouts collecteurs de Paris, avait chargé M. Boudet, l'un des membres de la commission, d'apprécier la valeur de ces plaintes et les altérations de la Seine produites par les égouts.

Le conseil de salubrité, dans sa séance du 23 octobre, après avoir entendu le rapport de M. Boudet, a émis le vœu qu'en présence des faits constatés dans le rapport, M. le Préfet de Police voulût bien insister auprès de l'administration municipale pour que les études, les recherches et les travaux destinés à résoudre l'important problème de l'assainissement de la Seine soient poursuivis avec la plus grande activité.

Ce rapport, qui a été lu à la commission au cours de ses délibérations, contient le détail des dosages de l'oxygène en dissolution dans les eaux de la Seine, dans un grand nombre de stations choisies en amont de Paris jusqu'à Corbeil, dans l'enceinte même de la capitale, et en aval jusqu'à Rouen.

C'est au tableau de ces analyses oxymétriques exécutées par MM. Boudet et Gérardin que nous avons emprunté tous les titrages d'oxygène que nous avons consignés dans notre travail.

précisant les matières susceptibles d'entrer encore en fermentation. Les dosages d'oxygène formaient le complément de ces premières recherches ; ils fixaient l'intensité de la fermentation déjà produite, ils mesuraient le résultat final des réactions accomplies; les deux procédés se complétaient et s'éclairaient l'un l'autre.

Le tableau suivant résume les dosages effectués :

INDICATION DES PRISES D'ÉCHANTILLONS D'EAU DE SEINE	AZOTE non encore transformé en sels ammoniacaux volatils ou azote organique exprimé en grammes par mètre cube ou 1,000 lit. d'eau. (Analyse de 1874).	AZOTE total y compris les sels ammoniacaux volatils exprimés en grammes par mètre cube. (Analyses de 1869 et 1871.)	OXYGÈNE dissous exprimé en centimètres cubes par litre d'eau.	OBSERVATIONS
	grammes	grammes	cent. cubes	
Pont d'Anières, amont du collecteur.	0,85	1,5	5,34	Le bras gauche, formé par l'île Saint-Denis, présente, à la hauteur d'Epinay, les doses suivantes : Azote { organique 0,35 ; total. . . . 1,50 ; Oxygène. . . . 5cc00
Débouché du collecteur de Clichy.	»	29,5	»	
Clichy, aval du collecteur. { Bras droit. . . .	1,51	4,0		
Clichy, aval du collecteur. { Bras central. . .	1,28	»	4,60	
Clichy, aval du collecteur. { Bras gauche.. . .	1,25	»		
Saint-Ouen, bras droit.	1,16	2,0	4,07	
Saint-Denis, bras droit, amont du collecteur.	»	2,0	2,65	
Débouché du collecteur départemental.	»	98,0	»	
Saint-Denis, bras droit, aval du collecteur et du Croult.. . . .	7,27	7,0	1,02	
Épinay, bras droit.	1,26	3,0	1,03	
Bezons, toute la largeur du courant..	0,87	0,9	1,54	
Marly, bras gauche, amont du barrage.	0,78	3,5	1,91	
Marly, aval du barrage..	0,81	»	»	
Saint-Germain.	0,76	2,2	»	
Maisons-Laffite..	0,79	2,5	3,74	
Conflans..	0,46	»	»	
Poissy..	0,45	2,2	6,12	
Triel.	0,50	»	7,07	
Meulan.	0,40	»	8,17	
Mantes..	»	1,4	8,96	
Vernon.	»	»	10,40	
Rouen..	»	»	10,42	

D'après les chiffres contenus dans ce tableau, on voit la quantité d'azote organique, qui atteint seulement 0^{gr},85 par mètre cube avant le collecteur de Clichy, passer à 1^{gr},50 sur la moitié droite du courant, après l'addition des eaux de ce collecteur, et atteindre 7^{gr},27 après l'addition des eaux du collecteur départemental. L'azote total passe de 1^{gr},5 au pont d'Asnières, à 4 grammes après le collecteur de Clichy, puis atteint 2 grammes, puis enfin 7 grammes après le collecteur départemental. Sur la partie gauche, l'altération est sensible à Clichy, où la quantité d'azote organique est de 1^{gr},25. Au delà de Saint-Ouen, l'amélioration se manifeste de ce côté, et, en face de Saint-Denis, le bras gauche ne dose plus que 0^{gr},35. Revenant au bras droit, nous le trouvons encore infect à Épinay, 1^{gr},26 d'azote organique et 3 grammes d'azote total. A Bezons, le titre en azote organique est redevenu sur toute la largeur du courant ce qu'il était au pont d'Asnières ; il se maintient dans les mêmes limites jusqu'à Marly. L'azote total, après une baisse passagère à Bezons, reste à une dose élevée, 3^{gr},5, jusqu'à Marly ; cette dose, rapprochée du titre assez bas en azote organique, indique que dans ces parages la transformation des matières organiques en matières minérales est à peu près achevée. Au delà de Marly et

jusqu'à Meulan, le titre en azote organique va en baissant constamment ; à Meulan, il n'est plus que la moitié de ce qu'il était, même en amont du collecteur. L'eau est donc en ce point d'une pureté chimique très-satisfaisante. Les causes organiques de fermentation ont presque totalement disparu. Quant à l'oxygène qui suit la fermentation, comme la précède l'azote non décomposé, il part de 5^{cc},34 au pont d'Asnières, varie entre 4^{cc},6 à Clichy (moyenne des trois bras) et 2^{cc},6 vers Saint-Denis (bras droit), présente son minimum en aval de Saint-Denis, où la dose n'est plus guère que de 1 centimètre cube. Il conserve un titre très-bas jusqu'à Marly, où il n'est encore qu'à la dose de 1^{cc},91. Il se relève ensuite lentement, retrouve entre Maisons-Laffite et Conflans sa valeur du pont d'Asnières, et revient enfin à un titre élevé de 8 à 9 centimètres cubes de Meulan à Mantes. Quant au bras gauche, formé par l'île Saint-Denis entre Saint-Ouen et Argenteuil, l'oxygène, comme l'azote, indique une amélioration sensible en face Saint-Ouen, où l'oxygène est coté 5 centimètres cubes.

De ces chiffres résulte donc que l'eau est profondément altérée par les matières organiques fermentescibles dans toute sa largeur de Clichy à Saint-Ouen, tout le long de l'île Saint-Denis sur le bras droit entier, et retrouve, à ce point de vue, le même état qu'à Asnières, entre Bezons et Marly ; que, dans ce dernier parcours, elle est encore chargée de matières azotées minérales ; qu'en outre, cette eau, dépouillée progressivement de son oxygène jusqu'à l'extrémité de l'île Saint-Denis, conserve une aération absolument insuffisante jusqu'à Marly et au delà, reprend le titre d'Asnières seulement au delà de Maisons-Laffite et n'arrive à une bonne qualité que vers Meulan. En ce point, l'eau se trouve régénérée à la fois par la transformation de ses matières organiques azotées en matières minérales et par la récupération de l'oxygène qu'elle avait perdu par la fermentation.

Les données scientifiques viennent ainsi confirmer les faits qui résultent d'une simple observation superficielle. En somme, entre Clichy et l'extrémité de l'île Saint-Denis, en amont d'Argenteuil, l'eau de la Seine, dans le bras qui reçoit les collecteurs, est absolument impropre à un usage domestique quelconque ; elle renferme des éléments fermentescibles prêts à entrer en décomposition et à répandre l'infection ; l'oxygène dissous a presque totalement disparu. Entre Argenteuil et Marly, sur le bras gauche, l'eau devient moins impure et, au point de vue chimique, elle est susceptible de se prêter à une grande partie des usages courants auxquels peuvent la consacrer les riverains ; sans être impropre à l'alimentation, elle a encore une aération insuffisante et est chargée d'une assez forte proportion de substances minérales azotées. Au delà de Marly, l'amélioration est progressive ; l'eau est de qualité acceptable à tous les points de vue vers Conflans et de bonne qualité à Meulan.

La commission n'a pas cru devoir clore l'examen scientifique de l'altération de la Seine en aval des collecteurs sans fixer un instant son attention sur les gaz, produit de la fermentation, dont elle avait remarqué l'abondant dégagement depuis Clichy jusqu'à l'extrémité de l'île de Saint-Denis, précisément dans l'étendue du fleuve où se produit l'absorption successive de l'oxygène.

Les ingénieurs du service municipal lui ont fourni une analyse de ce gaz, faite à leur laboratoire de Clichy en 1871.

Hydrogène protocarboné.	72,88	p. 100.
Acide carbonique.	12,30	—
Oxyde de carbone.	2,54	—
Acide sulfhydrique..	6,70	—
Divers	4,58	—

Comme on le voit, le gaz est constitué en majeure partie d'hydrogène protocarboné (gaz des marais). Il brûle avec une flamme bleuâtre. Outre les éléments asphyxiants (hydrogène carboné et acide carbonique), il renferme des éléments toxiques (oxyde de carbone et acide sulfhydrique), et effectivement, un animal de petite taille, introduit sous une cloche pleine de gaz, périt instantanément. Un des membres de la commission, en présence de la composition de ces gaz, avait émis des craintes au sujet des

dangers immédiats que pouvait faire courir à la santé publique leur dégagement permanent, mais, après discussion, la majorité de la commission n'a pas cru devoir partager ces craintes : il a été fait observer que les gaz dégagés étaient immédiatement dilués dans une masse d'air considérable ; qu'aucun fait n'était venu révéler l'imminence d'un danger quelconque résultant de ces émanations; que les agents du service des égouts ou des vidanges n'étaient sujets à aucune affection grave spécialement due aux miasmes qu'ils respirent journellement; que, du reste, si les plaintes des riverains de la Seine étaient incessantes et de plus en plus vives au sujet de la qualité des eaux du fleuve, on ne trouvait aucune trace de plaintes relatives à l'altération de l'atmosphère, et qu'au contraire les rives de la Seine à Argenteuil, Bezons, Chatou, Bougival, garnies de maisons de campagne, avaient une réputation d'air pur qu'elles ne sauraient conserver si des affections spéciales les avaient envahies.

La commission a donc été d'avis qu'en l'état actuel des choses rien ne portait à croire que les gaz dégagés de la Seine eussent une action immédiate et directe sur la santé publique. Il va du reste de soi que toute solution applicable à l'assainissement du fleuve entraînera l'enlèvement des eaux infectes du cours même de la Seine et fera ainsi disparaître les éléments de la fermentation et par suite les gaz méphitiques qui en sont la conséquence.

CAUSES DE L'INFECTION DE LA SEINE

1° Causes prédominantes, eaux des collecteurs, leur cube journalier, leur composition

L'étude de l'état du fleuve que vient de présenter la commission montre clairement quelles sont les causes prédominantes de l'infection du fleuve : ces causes sont évidemment l'afflux des eaux d'égout de Paris. Sans insister par conséquent sur des recherches détaillées, faites sur les eaux d'égout dans des rapports spéciaux par les ingénieurs du service municipal de la ville de Paris, la commission terminera la première partie de son travail par la citation de quelques chiffres qui permettront d'apprécier ces eaux prises isolément, avant leur mélange aux eaux du fleuve; ces chiffres seront la preuve, en quelque sorte mathématique, de l'influence que doit forcément exercer l'afflux continuel de matières décomposables dans un courant originairement pur, influence que la commission a effectivement décrite et étudiée dans son examen de l'état du fleuve.

Le réseau des égouts de Paris, qui, en 1856, ne comptait que 160 kilomètres, comprend aujourd'hui 575 kilomètres d'égout public et atteint, avec ses annexes, 771 kilomètres. Ce vaste réseau réunit les eaux de pluie, les eaux ménagères, les eaux vannes des tinettes-filtres et des urinoirs publics, une partie des balayures des rues, etc.

Les deux bouches de Clichy et de Saint-Denis versent en Seine un cube journalier moyen d'environ 260,000 mètres cubes, soit à peu près 3 mètres cubes à la seconde, dont les quatre cinquièmes à Clichy (2^{mc},500) et le cinquième à Saint-Denis (0^{mc},500); c'est, par an, un cube total de 95 millions de mètres cubes d'eaux impures versées en Seine; ce chiffre atteindra prochainement 100 millions après l'achèvement des travaux de la Vanne. Comme il a été exposé ci-dessus, cet afflux de matières étrangères se traduit par des atterrissements solides et par la pollution des eaux. En effet, chaque mètre cube déversé à Clichy contient, en moyenne 1^k,28 de matières solides; à Saint-Denis, nous avons 1^k,54 de matières solides. Chaque année, le collecteur de Clichy encombre ainsi de 100,000 tonnes de matières solides le lit du fleuve, et le collecteur de Saint-Denis de 25,000 tonnes, soit 125,000 tonnes en tout. Et ces dépôts n'ont pas le seul inconvénient d'encombrer le lit : ils renferment 10 à 25 pour 100 de matières organiques avec 0^k,4 à 0^k,6 d'azote pour 100. Ils sont donc susceptibles de subir les décompositions ultérieures que manifestent les eaux de la Seine. Ils ne renferment, du reste, qu'une fraction des éléments décomposables apportés par les collecteurs, car à Clichy, l'eau

totale d'égout, outre $1^k,28$ de matières solides, renferme $0^k,82$ de matières dissoutes, et l'ensemble, qui représente un poids de $2^k,10$ par mètre cube, dose :

	0 k. 040 d'azote.
	0 k. 660 de matières volatiles ou combustibles organiques en grande partie.
	1 k. 400 de matières minérales.
Total. . .	2 k. 100

A Saint-Denis, aux $1^k,54$ de matières solides s'ajoutent $1^k,92$ de matières organiques dissoutes, soit en tout $3^k,46$, dosant :

	0 k. 140 d'azote.
	1 k. 380 de matières volatiles ou combustibles.
	1 k. 940 de matières minérales.
Total. . .	3 k. 460

L'influence des matières de vidange se traduit ici par une dose d'azote trois fois et demie plus forte qu'à Clichy et une dose double de matières volatiles et combustibles. On comprend donc la recrudescence d'altération qu'apporte en Seine le collecteur départemental, puisque, tout en ne représentant en volume que le cinquième du collecteur de Clichy, il représente, par son infection spéciale manifestée par son azote, les 0,7 du même collecteur au point de vue de la pollution de la rivière.

Ces quelques chiffres suffisent pour caractériser chimiquement les deux affluents qui viennent infecter la Seine en aval de Paris. Il n'est du reste pas inutile de remarquer que le débit total du fleuve n'étant guère que de 45 mètres en étiage, soit quinze fois seulement le débit du collecteur, et la vitesse en Seine descendant alors à quelques centimètres ($0^m,13$ constatés en étiage, en 1869), par suite du fonctionnement des barrages établis à Suresnes et Bezons, les eaux d'égout de Paris se trouvent déversées dans une sorte de bassin sans vitesse, où elles rencontrent toutes les conditions les plus favorables à leur décomposition.

Il serait injuste de ne pas ajouter qu'avec les conditions nouvelles introduites dans les allures de la Seine par la généralisation des barrages, les effets d'infection constatés aujourd'hui au-dessous de Clichy se produiraient, sans la création des collecteurs, dans la traversée même de Paris et dans la riche banlieue de Sèvres, Saint-Cloud, Neuilly, Courbevoie. Les grands collecteurs assainissent donc les parties les plus populeuses de l'agglomération parisienne; ils concentrent l'infection des eaux d'égout, mais sans l'accroître, et ils offrent même par cette concentration, ainsi qu'il sera exposé plus loin, la possibilité de remédier à leurs propres inconvénients; il serait absolument impossible de songer à un remède de quelque efficacité avec l'ancien système des bouches d'égout multiples réparties sur chaque rive.

2° Causes secondaires. Petits égouts; eaux industrielles

A ce sujet, plusieurs membres ont attiré l'attention de la commission sur les causes d'infection qui subsistent encore en amont même du débouché des collecteurs; ces causes sont certainement secondaires à l'heure présente, en regard de l'afflux considérable des collecteurs; elles ne produisent pas d'altération bien profonde du fleuve, et des prises d'eau pour l'alimentation publique peuvent fonctionner sans inconvénient pratique à Choisy, au pont d'Austerlitz, à Chaillot, à Suresnes. Mais déjà, d'après les recherches d'un membre de la commission, M. Boudet, on constaterait à la traversée de Paris une diminution sensible dans l'aération des eaux de la Seine, corollaire de l'existence d'une dose non négligeable de matières organiques. On trouverait, en effet, dans un litre d'eau de Seine les quantités suivantes d'oxygène (centimètres cubes) :

Amont de Paris.

Amont de Corbeil	9,32
Aval de Corbeil	8,77
Barrage d'Évry	7,53
Choisy-le-Roi	7,52
Barrage du Port-à-l'Anglais	8,80
Pont d'Ivry	9,50

Azote organique, 0 gr., 53 par mètre cube.

Traversée de Paris.

Pont de la Tournelle	8,05
Viaduc d'Auteuil	5,99

Azote organique, 0 gr., 56 par mètre cube.

Aval de Paris.

Pont de Billancourt	5,69
Pont de Sèvres	5,40
Pont d'Asnières	5,34

Azote organique, 0 gr., 25 par mètre cube.

On aperçoit une diminution d'oxygène vers Choisy-le-Roi, un accroissement après la chute du barrage de Port-à-l'Anglais, puis une diminution progressive à la traversée de Paris, et au delà jusqu'à Asnières. Les rives de la Seine, malgré l'immense service que leur rendent les collecteurs, restent, en effet, soumises aux causes suivantes d'altération :

Au-dessus de Corbeil, eaux industrielles de l'Essonne.

En amont de Paris, de Choisy-le-Roi aux fortifications :

10 établissements insalubres, tels que : féculerie, maroquinerie, lavage de feutres et de laines, teintureries, fabriques de produits chimiques, de caoutchoucs, de poudrette, usines métallurgiques; plus 6 égouts amenant en Seine les eaux des communes de Choisy, Maisons, Charenton, Vitry, Ivry.

Dans la traversée de Paris, 15 égouts de rive non encore réunis aux collecteurs, plus les égouts des îles de la Seine et les bateaux à lessive, ces derniers, au nombre de 24, déversant chaque année en Seine 176 tonnes de sel de soude et 132 tonnes de savon.

En aval de Paris, jusqu'à Asnières, 10 égouts faisant le service de Billancourt, Sèvres, Suresnes, Puteaux, Neuilly, Courbevoie, Asnières ; ces égouts sont souvent chargés d'eaux industrielles, et l'un d'eux, formé de l'ancien rû de Marivel recouvert, déverse sur la rive droite du fleuve les eaux vannes du dépotoir de la ville de Versailles. De Clichy à Saint-Denis, on voit même s'ajouter à l'action des collecteurs celle de 7 égouts (Clichy, Saint-Ouen, Saint-Denis) et 15 usines, fabriques de produits chimiques, savons, bougies, gants, colle, féculeries, tanneries, etc. Enfin, la commission a constaté, dans sa tournée du 11 octobre, l'afflux infect que le Croult déverse à Saint-Denis, après avoir servi d'exutoire aux nombreuses usines de la localité.

La commission ne pouvait négliger absolument ces faits secondaires d'infection ; si aujourd'hui ils laissent la Seine suffisamment pure avant les collecteurs, s'ils sont en quelque sorte masqués par les faits prédominants dus aux eaux de ces collecteurs, ils pourraient, par leur multiplication, reproduire sur une échelle restreinte les inconvénients que la commission vient d'analyser au-dessous de Clichy; déjà leur influence semble se faire sentir sur l'aération de l'eau de la Seine dans la traversée de Paris : il convient donc de signaler ces exutoires secondaires et de leur appliquer, soit directement, soit par la réunion aux collecteurs développés, les procédés d'épuration que la commission se propose actuellement d'examiner et d'apprécier dans la seconde partie de son travail.

DEUXIÈME PARTIE

EXAMEN ET CHOIX DES MESURES A PRENDRE POUR REMÉDIER A L'INFECTION DE LA SEINE

Examen et choix des mesures à prendre. Principes

L'examen et le choix des mesures à prendre pour remédier à l'infection de la Seine constituaient la partie la plus importante et la plus délicate du travail de la commission. Les intérêts engagés sont en effet considérables ; d'une part, il convient de laisser à une ville de 2 millions d'habitants comme Paris toutes les facilités désirables pour son assainissement intérieur, pour la disparition prompte et libre de tous les détritus qu'engendre la vie journalière d'une pareille agglomération d'individus ; d'autre part, il ne saurait être conforme à l'équité de faire retomber sur un point spécial de la banlieue tous les inconvénients dont la ville de Paris s'est déchargée, ou du moins faut-il chercher à atténuer et même faire disparaître, s'il est possible, ces fâcheuses conséquences extérieures de l'assainissement intérieur de la cité.

La commission, tout en maintenant fermement les principes, devait donc apporter dans l'examen des procédés et dans ses conclusions la mesure que lui imposait l'importance même de la question ; elle devait s'arrêter, avant tout, à des faits et à des remèdes pratiques.

C'est dans cet esprit qu'a été sommairement traitée la question de légalité que soulève l'écoulement en Seine des eaux des collecteurs.

Ainsi que M. le ministre l'a lui-même indiqué dans sa lettre du 22 juillet 1874 à M. le préfet de la Seine, les textes sont formels pour interdire l'écoulement ou le déversement d'immondices dans les fleuves ou rivières et spécialement en Seine.

Mais à côté du droit strict pour l'administration d'intervenir et d'édicter des prescriptions coercitives, conformes aux textes légaux, il convient de constater combien la pratique, généralement tolérée en France, est peu en corrélation avec la netteté des lois et règlements. Presque partout les industriels et les municipalités ont considéré les cours d'eau comme des réceptacles de détritus. On conçoit qu'il faille tenir aujourd'hui compte des nécessités de l'industrie ou de la salubrité intérieure des villes avant de prescrire l'application trop hâtive de procédés d'assainissement encore bien neufs.

Si donc l'intensité des faits constatés en Seine doit attirer immédiatement l'attention de l'administration supérieure sur la responsabilité qui incombe à la ville de Paris et que celle-ci ne décline pas, la commission pense qu'il convient à la fois de généraliser les remèdes qui peuvent être prescrits en les étendant à d'autres espèces et d'apporter en exécution tous les ménagements nécessaires. Sans s'arrêter à une discussion de stricte légalité, elle insiste sur l'infection qui existe en fait en Seine, dans une partie populeuse de la banlieue, au voisinage des prises d'eau de Saint-Ouen, de Saint-Denis, d'Épinay, de Marly, du Vésinet, de Saint-Germain, de Maisons-Laffite, et, se rangeant à l'avis émis par le conseil des ponts et chaussées en 1870, elle pense que : « l'écoulement en Seine des eaux des collecteurs de Clichy et de Saint-Denis a, au point de vue de la salubrité, des inconvénients auxquels la ville de Paris est tenue de remédier. »

Enlèvement des détritus solides. Draguages. Leur insuffisance au point de vue de l'assainissement du fleuve

Abordant l'examen des remèdes à apporter à la situation présente, la commission, sous réserve des procédés plus radicaux qu'elle examinera ci-dessous, doit insister sur l'absolue nécessité de continuer les vigoureux draguages qui combattent l'encombrement de

la Seine aux embouchures des collecteurs : indépendamment des questions de salubrité publique, il y a là une nécessité urgente au point de vue de la navigation. On a vu, dans la première partie du rapport, que les collecteurs versent en Seine, par an, 150,000 tonnes en poids de matières solides, soit un volume vaseux de 200,000 à 300,000 mètres cubes. Les parties les plus lourdes forment les bancs qui émergent périodiquement et que le service de la navigation a dragués depuis quelques années dans les proportions suivantes :

	Mètres cubes. Nombres ronds.
1868	69,000
1869	58,000
1870	57,000
1871	64,000
1872	66,000
1873	82,000

En 1874, le budget de la ville de Paris portait un crédit de 180,000 francs pour les draguages aux embouchures des collecteurs. Mais ces opérations, exécutées sur les saillies des bancs d'atterrissement, appliquées du reste à des cubes inférieurs à l'apport annuel des collecteurs, ne peuvent éviter le comblement des bas-fonds et l'encrassement progressif du lit du fleuve par les vases et les matières organiques légères : de là, l'extension et l'accroissement annuel des phénomènes de fermentation dans les profondeurs mêmes du courant, pollué à la surface par les matières fermentescibles dissoutes. La commission ne saurait donc voir dans les draguages qu'un palliatif provisoire dont elle recommande l'application incessante, mais qui ne peut, à aucun titre, être érigé en solution de la question.

Systèmes divers proposés pour l'assainissement de la Seine. Réfutation

La commission ne pouvait davantage s'arrêter à un certain nombre de systèmes, émis par diverses personnes et dont la seule nomenclature montrera l'inanité :

1° *Prolongement des égouts collecteurs jusqu'à la Seine maritime ou jusqu'à la mer.* — Ce projet entraînerait à des dépenses énormes, tout en reportant simplement l'infection sur un point de nos côtes.

2° *Prolongement des égouts collecteurs jusqu'au confluent de l'Oise.* — L'augmentation de débit due à l'Oise ne ferait qu'étendre et déplacer l'infection sans en détruire les causes prédominantes, c'est-à-dire les matières fermentescibles.

3° *Dilution des eaux d'égout dans l'intérieur des collecteurs ou à leur débouché par addition d'eau claire.* — La dilution aurait simplement pour effet, comme ci-dessus, d'étendre l'infection sur un espace plus considérable. Ce procédé, comme les deux précédents, ne permettrait, du reste, aucune utilisation par l'agriculture des matières fertilisantes contenues dans les eaux d'égout.

4° *Filtration des eaux d'égout à travers des substances diverses.* — Cette opération donne toujours un résultat incomplet : les matières solides argileuses et les matières dissoutes passent à travers les filtres. Ceux-ci exigent un entretien continuel et constituent, avec leurs bassins annexes, un danger sérieux pour la salubrité publique. L'opération est en même temps coûteuse spécialement au point de vue de l'exploitation.

5° *Établissement, aux débouchés des collecteurs, de grands bassins de décantation par simple action de la pesanteur.* — Il faudrait donner aux bassins de très-grandes dimensions, créer par suite de vastes foyers d'infection ; l'épuration par simple action de la pesanteur serait des plus imparfaites, et le maniement des dépôts présenterait de graves nconvénients.

Épuration par les procédés chimiques et spécialement par le sulfate d'alumine
Insuffisance et cherté du système

Les objections qui viennent d'être indiquées s'appliquent, au moins en partie, aux systèmes divers dans lesquels la précipitation des matières solides est hâtée par l'addition de réactifs chimiques. Les eaux d'égout, renfermant des matières minérales ou organiques très-diverses qui leur donnent généralement une réaction alcaline, se prêtent à des opérations chimiques dont elles deviennent un des éléments; si l'on arrive à produire dans leur sein un précipité gélatineux ou floconneux, ce précipité peut tomber au fond de bassins convenablement disposés, entraînant avec soi les matières solides contenues dans le liquide impur et laissant échapper par un déversoir d'aval une eau suffisamment claire. Sur la proposition de M. l'inspecteur général des mines Le Chatelier, la ville de Paris a fait des essais prolongés et multipliés sur le sulfate d'alumine, qui semblait présenter pour les eaux d'égout des collecteurs des avantages pratiques sur la chaux et autres réactifs préconisés soit en France, soit en Angleterre. Des bassins d'épuration ont été établis au premier champ d'essai qui fonctionnait à Clichy en 1867-1869; d'autres bassins, plus vastes et mieux installés, existent encore dans la plaine de Gennevilliers sur les terrains que possède la ville de Paris. Dans sa tournée du 11 octobre, la commission a pu voir fonctionner un de ces bassins, et l'eau qui s'en échappait était parfaitement claire. 600,000 à 700,000 mètres cubes d'eau d'égout ont subi, à diverses reprises, ce traitement, et sont sortis clarifiés des bassins. Mais il y aurait une erreur profonde à confondre ces eaux ainsi clarifiées avec des eaux réellement épurées. Le sulfate d'alumine, après s'être décomposé en présence de l'alcalinité des eaux d'égout et avoir donné de l'alumine à l'état de gélatine grenue, effectue simplement une opération mécanique de collage; les matières solides sont entraînées au fond des bassins; les matières dissoutes, y compris les matières organiques fermentescibles, restent dans l'eau claire. C'est ce que l'analyse chimique démontre surabondamment; le tableau suivant donne en effet le résumé d'analyses poursuivies pendant les années 1867-1868 :

	Eau d'égout naturelle.	Eau épurée au sulfate d'alumine.
Azote	0k 037	0k 021
Matières volatiles et combustibles	0,729	0,240
Matières minérales	2,038	0,724
Total	2k 804	0k 985

L'eau épurée contient donc les deux tiers de l'azote total de l'eau d'égout, et le tiers des matières volatiles ou combustibles, lesquelles sont en grande partie organiques. Ces faits ne sont pas, du reste, particuliers au sulfate d'alumine : le docteur Frankland, chargé par le gouvernement anglais d'une étude générale sur la pollution des rivières, a trouvé, en soumettant à l'analyse les divers réactifs proposés et essayés, qu'ils ne faisaient disparaître en moyenne que les 0,37 de l'azote organique contenu dans les eaux d'égout, laissant dans les eaux clarifiées les 0,63 de ce même azote. Il convient d'ajouter, à la décharge du sulfate d'alumine, qu'il renferme habituellement un excès d'acide sulfurique, que cet acide agit comme un antiseptique pour retarder la fermentation, et que les eaux clarifiées ne présentent plus les décompositions intenses qu'offrait l'eau d'égout à l'état naturel. Mais elles sont encore loin de pouvoir servir aux usages domestiques les plus simples; elles n'ont aucun caractère des eaux potables, et leur introduction dans le fleuve, tout en constituant une amélioration sur l'état actuel, ne saurait être considérée comme absolument inoffensive. D'ailleurs, appliqué en grand, le procédé laisserait des masses énormes de dépôts boueux dans les bassins : on se rappelle que le cube annuel des vases d'égout n'est pas inférieur à 200,000 mètres cubes. Se représente-t-on cette quantité énorme, séchant sur plusieurs hectares de superficie, maniée ensuite pour être chargée soit sur des voitures, soit en bateau? Ces dépôts ont-ils, du reste, une forte valeur agricole? Aucunement : ils dosent aux 1,000 kilogrammes 6 à 8 kilogrammes seulement

d'azote perdus dans une masse de matières minérales ou terreuses; une longue pratique a montré que ces dépôts ont la valeur agricole des terreaux de bonne qualité ou de la gadoue consommée, produits avec lesquels ils ont la plus grande similitude. La valeur vénale de ces engrais ne dépasse guère, rendus à pied d'œuvre, 6 à 8 francs la tonne. Or, que coûterait cette même tonne de résidus des bassins? En réactifs seuls, elle aurait absorbé pour sa production 8 à 10 francs, c'est-à-dire tout ce qu'elle vaut, sans même compter les frais d'élévation des eaux, la manipulation des dépôts, leur transport, etc., opérations qui augmenteraient encore la dépense dans de notables proportions. La question financière suffirait à elle seule pour empêcher de songer sérieusement à l'application du système à la totalité des eaux d'égout. La longue expérience de la ville de Paris ne permet pas d'espérer une dépense d'épuration inférieure à 1 centime par mètre cube traité ; ce serait donc par an une dépense de 1 million de francs pour les 100 millions de mètres cubes vomis par les collecteurs, rien qu'en réactifs. Il resterait à ajouter tous les autres frais, élévation des eaux, etc. Une pareille dépense est absolument hors de proportion avec le résultat imparfait obtenu.

La commission, à l'unanimité de ses membres, a donc été d'avis que l'épuration par les procédés chimiques ne pouvait constituer une solution générale et pratique de la question. Elle ne peut lui donner un autre caractère que celui d'un palliatif cher et imparfait. On examinera, dans la suite de ce rapport, si, dans certains cas particuliers, la clarification chimique ne peut pas rendre quelques services comme complément provisoire et temporaire des solutions vraiment complètes de l'assainissement des eaux impures.

Assainissement de la Seine par l'action combinée du sol et de la végétation Irrigation à l'eau d'égout

C'est dans l'action combinée du sol et de la végétation que la commission pense qu'il convient de chercher uniquement ces solutions. Par l'irrigation pratiquée sur un sol perméable, les eaux d'égout deviennent non-seulement inoffensives, mais productives et fertilisantes : la salubrité publique reçoit toute satisfaction, et du même coup la culture retrouve une source d'engrais anéantis jusqu'ici en pure perte.

La commission est arrivée sur ce point à une conviction unanime qui lui semble justifiée par les considérations et observations suivantes :

Principe et théorie du système

Lorsque des eaux impures, chargées à la fois de matières suspendues et de matières dissoutes, sont versées sur un sol perméable, la couche superficielle de ce sol commence par jouer le rôle de « filtre » : toutes les matières suspendues sont séparées par une action simplement mécanique. Sans sortir des expériences de laboratoire, la commission a pu constater au bureau du service municipal, à Clichy, qu'une grande caisse de 2 mètres de hauteur ou même un simple vase en verre de 50 centimètres, remplis de terre et de sable caillouteux de la plaine de Gennevilliers, suffisait pour clarifier complétement et pendant des mois entiers les eaux d'égout les plus chargées versées à leur surface. On connaît les grands phénomènes de filtration permanente que présentent certains terrains : c'est ainsi qu'un des membres de la commission a pu citer les alluvions du pays de Caux, ou 5 à 6 mètres de limon, déposés au-dessus d'une couche de craie fendillée, n'ont jamais empêché la perméabilité constante du terrain. Après ce filtrage mécanique superficiel, les eaux traversent, clarifiées, les couches supérieures du sol ; là elles rencontrent les radicelles des plantes qui absorbent à leur profit les substances fertilisantes qui restaient encore à l'état de dissolution et maintenaient aux eaux, malgré leur clarté, une réelle impureté. Si l'on cherche, à l'aide de l'analyse, les quantités d'eaux d'égout nécessaires pour fournir à certaines plantes maraîchères les éléments essentiels à un bon rendement, tels que l'azote, les alcalis ou l'acide phosphorique, on trouve qu'il faut environ

15,000 mètres cubes d'eau d'égout à l'hectare ; donc, pour entretenir trois récoltes successives de ces produits, il faut au minimum 45,000 mètres cubes d'eau d'égout, sans compter les pertes et les quantités absorbées par les plantes parasites ; ce sont donc 45,000 mètres cubes qui se trouvent dépouillés au profit de la culture des éléments qui précisément altéraient la pureté des eaux. Au cas où la culture ne serait pas aussi intensive et n'offrirait pas aux eaux d'une manière aussi continue les organes absorbants des végétaux, le sol se charge de retenir, à lui seul, au passage, la majeure partie des éléments fertilisants : 80 pour 100 du carbonate d'ammoniaque, 74 pour 100 du carbonate de potasse, etc. Enfin, pour les eaux qui auraient échappé, soit à l'action absorbante des plantes, soit à l'action retentive du sol, elles suivent leur marche descendante, au cas où le sous-sol est naturellement ou artificiellement perméable. Elles subissent, dans les couches de ce sous-sol, une action oxydante qui agit puissamment sur les matières azotées et les fait passer de l'état de substances organiques à l'état d'azotates ou azotites, substances purement minérales, n'offrant plus aucun danger de fermentation, absolument inoffensives lorsqu'elles sont diluées dans un volume d'eau suffisant. C'est ainsi que l'analyse chimique a appris que les eaux sortant des appareils d'expérience déjà cités plus haut ne renfermaient plus de traces sensibles d'azote décomposable, tandis qu'elles dosaient en moyenne 43 grammes d'azote total par mètre cube avant de traverser le sol ; on n'y trouvait plus qu'une très-faible dose d'azote à l'état d'ammoniaque minérale : 1^{gr},600 en moyenne ; c'est ce que la Seine renferme avant d'être atteinte par l'afflux infect des collecteurs. On y constatait, au contraire, des doses notables de nitrate, qui se sont élevées jusqu'à un chiffre correspondant à 41 grammes d'azote au litre, lorsque aucune végétation n'existait à la surface. Le mouvement de descente à travers un sol poreux assure même aux eaux effluentes une aération satisfaisante; l'eau d'égout versée à la surface du sol dans les expériences de Clichy contenait à peine 2 centimètres cubes d'oxygène au litre : elle sort d'une couche de terrain caillouteux de 2 mètres d'épaisseur avec un titre de 7 à 10 centimètres cubes. C'est dans cet état de revivification complète que l'eau d'égout, *épurée* cette fois et non plus seulement *clarifiée*, va retrouver les eaux des nappes souterraines ou s'écoule dans des drains, lorsque ceux-ci ont été établis dans les sols d'une perméabilité naturelle insuffisante. L'enquête anglaise sur la pollution des rivières est arrivée à ces mêmes conclusions, grâce aux savantes recherches du docteur Frankland.

Application faite par la ville de Paris dans la plaine de Gennevilliers

La commission a examiné avec attention les procédés appliqués par la ville de Paris dans la plaine de Gennevilliers pour réaliser pratiquement et sur une grande échelle les phénomènes qui viennent d'être analysés.

Répétant en les développant les procédés expérimentés dès 1867-1868, par M. l'inspecteur général Mille, dans un champ d'essai installé alors à Clichy, les ingénieurs du service municipal de la ville de Paris ont commencé en juin 1869 l'irrigation de la plaine de Gennevilliers.

Les eaux d'égout sont élevées à Clichy à l'aide de pompes centrifuges qui, par l'absence de clapets, ont l'avantage de permettre le libre passage des corps solides charriés par le courant des collecteurs. Des machines à vapeur d'une force de 40 chevaux jusqu'en 1873, et aujourd'hui d'une force de 150 chevaux, actionnent ces pompes, refoulent les eaux à 11 mètres de hauteur environ, dans des conduites métalliques de 60 centimètres et de 1^{m},10 de diamètre, qui gagnent la plaine de Gennevilliers en passant sous les trottoirs du pont de Clichy. Du côté du collecteur départemental, une dérivation maçonnée de 1^{m},60 de hauteur sur 90 centimètres de largeur aux naissances, a été établie entre la porte de la Chapelle et le pont de Saint-Ouen. Les cotes du terrain permettent d'amener par cette dérivation, grâce à la seule pesanteur et après un parcours de 3,500 mètres, toutes les eaux d'égout sorties de Paris de ce côté. La machine à vapeur de Clichy peut refouler en service normal 0^{m},500 à la seconde, soit 44,000 mètres cubes par jour; la dérivation de

Saint-Ouen débite au besoin un cube égal. Les eaux des deux sources alimentaires viennent aujourd'hui se réunir dans une longue rigole en briques de 2 mètres de largeur et 1,500 mètres de longueur, établie sur les digues d'Asnières et de Gennevilliers; une conduite foncée en maçonnerie de 60 centimètres de diamètre et 1,950 mètres de longueur, une rigole en briques de 1^{m},20 de large et de 2,250 mètres de long, et 15 à 20 kilomètres de fossés en terre complètent le réseau de distribution. Ce réseau enserre une surface arrosable de 143 hectares. Sur ces 143 hectares, 115 avaient fait usage de l'eau d'égout au 1er octobre dernier. La répartition sur le sol se pratique à l'aide de raies séparées par des billons plus ou moins larges; ces raies se tracent : en plein champ, à la charrue; dans les parcelles passées à l'état de jardin, à la bêche et au cordeau.

Les plantes poussent sur les billons : leurs radicelles seules vont chercher l'humidité et l'engrais au voisinage des rigoles; les parties vertes des plantes ne sont jamais touchées par l'eau d'égout. En automne et en hiver il est quelquefois procédé à de vrais colmatages par submersion partielle des pièces à fumer, mais le plus souvent l'engraissement du sol dépourvu de végétation se fait également par rigoles et imbibition. Les quantités d'eau d'égout absorbées par les terrains de la plaine de Gennevilliers se sont élevées, depuis 1869, à plus de 18 millions de mètres cubes, savoir :

	Mètres cubes Nombres ronds.
1869	650,000
1870	810,000
1871. (Guerre et Commune	»
1872	1,500,000
1873	7,200,000
1874	8,000,000
TOTAL	18,170,000

Les doses annuelles à l'hectare ont varié de 50,000 à 100,000 mètres cubes.

Des bassins d'épuration avaient été installés en 1869 sur un terrain appartenant à la ville de Paris; après avoir clarifié, en 1869, 320,000 mètres cubes, et, en 1870, 97,000 mètres cubes d'eau d'égout, ces bassins ont cessé de faire un service courant en présence du développement de l'irrigation; ils subsistent aujourd'hui à l'état expérimental. Les dépôts extraits de ces bassins ont été employés dans les environs par les procédés d'enfouissage et aux doses usitées pour les gadoues des rues de Paris. Une partie des draguages exécutés en Seine est venue s'ajouter à ces dépôts et les remplace aujourd'hui dans les usages de la culture; le service de la navigation a ainsi déposé sur les terrains municipaux :

	Mètres cubes Nombres ronds.
1871	24,000
1872	18,000
1873	13,600

Ces dépôts sont exploités par un industriel qui, moyennant une redevance de 1,000 francs payée à la ville, les expédie et les revend à Colombes, Chatou, le Vésinet et autres localités voisines des rives de la Seine.

Résultats obtenus dans la plaine de Gennevilliers

La commission a examiné, tant au point de vue de la salubrité qu'au point de vue économique, les résultats de l'opération dont les traits principaux viennent d'être esquissés. Elle a pu d'abord constater combien les terrains de la plaine de Gennevilliers étaien propices à l'opération entreprise : ces terrains sont formés, en effet, d'une vaste couche

d'alluvion de 7 à 10 mètres d'épaisseur, contournée par la Seine; cette alluvion est composée de sables et cailloux recouverts d'une couche généralement mince de terre végétale. C'est au-dessous de cette masse perméable que règnent les couches qui arrêtent les eaux d'infiltration. Celles-ci forment une vaste nappe souterraine descendant des hauteurs du Mont-Valérien et de Buzenval vers la Seine et se tenant entre 2 et 4 mètres au-dessous de la surface du sol. La plaine de Gennevilliers constitue donc un immense filtre naturel, éminemment propre à absorber et purifier les eaux impures.

La commission a vérifié que la pratique justifiait ces présomptions théoriques; elle a vu sur les parois de carrières ouvertes dans la plaine une mince couche de terre arable sous laquelle se trouvaient des bancs de sable, cailloux et graviers, lesquels conservaient leur couleur naturelle sans montrer la moindre trace de dépôt noir de matières organiques, preuve palpable que la couche superficielle agissait bien comme un filtre énergique sur les eaux boueuses versées sur les champs irrigués. La commission a fait tirer devant elle l'eau de puits établis au milieu des terrains irrigués; cette eau était parfaitement limpide, sans saveur spéciale, identique, comme aspect et comme goût, aux eaux sulfatées de la nappe souterraine qui alimente les puits de toute la plaine comprise entre Rueil, Courbevoie et la Seine. Elle a fait des constatations identiques sur l'eau sortie d'un drain établi dans une portion du jardin d'essai de la ville de Paris et débouchant en Seine. Ces eaux, soumises à l'analyse chimique, ont été reconnues comme parfaitement pures de matières fermentescibles ; on a trouvé, en effet :

	Azote organique en grammes par mètre cube.	Azote total au mètre cube.
Eau du puits du jardin de la ville. . .	0g10	0g30
Eau du drain du jardin de la ville. . .	Traces insensibles	0,35

Ces eaux sont plus pures que celles de la Seine en amont des collecteurs, lesquelles renferment 85 centigrammes d'azote organique et 1gr,5 d'azote total; elles sont même supérieures à leurs similaires extraites de puits situés dans la même nappe, mais en dehors du périmètre irrigué, dans des terrains naturellement moins perméables et moins propres à l'oxydation; elles sont assimilables, pour la pureté chimique, aux eaux des sources d'Arcueil. C'est ce que montrent les chiffres suivants, correspondant à des puits voisins des stations de Courbevoie et de Colombes et à un échantillon d'eau d'Arcueil.

	Azote organique.	Azote total.
Puits de Courbevoie.	0g23	0g77
Puits de Colombe.	0,23	0,83
Eau d'Arcueil.	0,05	0,43

L'eau sortant du drain présente même une aération satisfaisante supérieure à celle de la Seine en amont des collecteurs : 6 centimètres cubes à 6cc,5 par litre. Dans les puits, là où la nappe n'est pas mise artificiellement en mouvement, la dose d'oxygène est moindre, 2 centimètres cubes à 3 centimètres cubes : c'est le phénomène que présentent les nappes soit dans les environs (puits d'Asnières, 3cc,6 ; puits de Clichy, 1 centimètre cube à 4cc,6), soit du côté de Saint-Denis (2cc,40, puits de Gonesse ; 3 centimètres cubes, Aubervilliers, etc.).

La commission ne peut donc que témoigner de l'action évidente actuelle du sol de la plaine de Gennevilliers. Elle ne pense pas du reste que cette action puisse prochainement s'arrêter par encrassement ; les grands phénomènes de filtration naturelle et spécialement ceux du pays de Caux, cités précédemment, permettent de croire à une perméabilité constante, même après la formation de bancs limoneux de plusieurs mètres d'épaisseur; or, la couche moyenne de dépôts effectués par la pratique de l'irrigation à Gennevilliers n'atteint pas 0,001 par an; les dépôts, ainsi qu'a pu le constater *de visu* la commission, ne sont pas gras et encrassants ; renfermant 50 pour 100 de matières siliceuses, ils sont friables et perméables par eux-mêmes; les façons de la culture les incorporent chaque année au sol et ont simplement pour résultat l'entretien ou l'accroissement d'une couche

de terre arable légère. Ce mécanisme de l'absorption des eaux et de l'incorporation des dépôts au sol avec utilisation par les plantes garantit en même temps de tout inconvénient au point de vue de la salubrité des localités environnantes. L'eau ne séjourne nulle part, et les phénomènes de fermentation ou d'oxydation s'accomplissent dans le sein de la terre, au lieu de se produire en Seine. La commission a pu voir autour du terrain municipal où commencèrent les cultures en 1869 tout un village de récente création : aucune affection spéciale ne s'est produite dans ce village, nommé les Grésillons, et l'accroissement journalier de cette localité naissante, au milieu même des champs où circule l'eau d'égout, est la meilleure preuve de l'innocuité du système. Quelques carriers ont prétendu que le niveau de la nappe qu'on rencontrait de tout temps à une faible profondeur au-dessous du sol se serait relevé depuis les irrigations; ces plaintes, nées au moment des inondations de 1872-1873, à un moment où le service d'irrigation ne fonctionnait pas, ne portent du reste que sur un fait purement mécanique qui n'intéresse à aucun titre le principe même ou le résultat hygiénique de l'opération; c'est un point de détail dont l'examen revient aux agents de la ville de Paris et auquel il serait facile de remédier par quelques drains, si, contrairement aux faits actuels, une pareille surélévation venait à se produire d'une manière permanente[1].

Quant au résultat agricole et économique, la commission a pu constater l'état prospère des cultures irriguées; elle a vu, dans un certain nombre de parcelles et spécialement sur le domaine municipal, comprenant 5 à 6 hectares loués à divers industriels, les produits les plus variés, depuis les légumes de toutes espèces jusqu'aux fleurs et aux fruits. Dans les terrains courants de la plaine, la culture des légumes est prédominante : les champs de choux et d'artichauts ont spécialement attiré l'attention de la commission. Un certain nombre de terrains sont consacrés à des plantes industrielles, parmi lesquelles on remarque la menthe poivrée, distillée dans l'usine voisine d'un parfumeur, M. Chardin-Hadancourt. Sur les limites du périmètre irrigué, la grande culture emploie les eaux comme fumure ou comme arrosage d'été; des seigles coupés en vert, des betteraves à bestiaux, des légumes et enfin quelques prairies voisines du bord de la Seine sont soumis à l'irrigation; les luzernes présentaient encore, au mois d'octobre, au moment de la visite de la commission, un aspect vivace et en étaient à leur quatrième ou cinquième coupe; les betteraves à bestiaux s'exploitaient et donnaient des rendements voisins de 100,000 kilogrammes à l'hectare. D'après les renseignements transmis par les ingénieurs du service municipal, la valeur locative des terrains irrigués a subi une hausse sensible depuis leur transformation. D'une valeur de 90 francs à 120 francs l'hectare, ils ont atteint 200 francs, 300 francs et même 400 francs. La ville de Paris loue son domaine à raison de 5 centimes du mètre carré, soit 500 francs l'hectare. Ces faits expliquent comment, à mesure que la ville étend ses conduites et rigoles, les cultivateurs usent des eaux mises à leur disposition; c'est ainsi que la surface irriguée a suivi le développement progressif qu'indique le tableau ci-dessous :

[1] Par une lettre adressée le 31 octobre 1874 à M. le ministre des travaux publics et renvoyée à l'examen de la commission, MM. Pommier et Cᵉ, fabricants de produits chimiques à Gennevilliers, se sont fait l'écho de ces plaintes. MM. Pommier ont été les fournisseurs de sulfate d'alumine de la ville de Paris tant que la ville a dû expérimenter l'épuration chimique. Dans un projet de pétition joint à leur lettre sans autres signatures que la leur, MM. Pommier insistent vivement sur les avantages qu'offrirait, suivant eux, le système de l'épuration chimique; ils reconnaissent qu'il est vrai que « les eaux d'égout ont amené la fertilisation de la plaine des Grésillons ; mais ils signalent en termes généraux les inconvénients et les dangers que présenterait le système des irrigations et insistent spécialement sur une prétendue inondation des caves et des carrières ». La commission ne peut que s'en référer aux considérations développées dans le corps du rapport; si les irrigations causaient un dommage bien et dûment constaté, les personnes atteintes auraient toujours, comme dans le cas d'un travail quelconque, la possibilité d'avoir recours aux tribunaux compétents. Ce ne sont pas quelques froissements d'intérêt privé qui peuvent et doivent arrêter une œuvre aussi considérable de salubrité publique, vivement réclamée par les riverains de la Seine, comme en font foi deux pétitions émanées des industriels de Clichy et du Conseil municipal d'Épinay, et renvoyées également à la Commission.

ANNÉES	MOIS	LONGUEUR des rigoles et conduites maîtresses en dehors du domaine municipal	SURFACES soumises aux eaux d'égout
			h. a. c.
1869	»	»	6 38 82
1870	»	»	21 82 73
1871	»	Guerre et Commune	
1872	Juillet	2,770	45 41 32
	Novembre	3,877	51 17 52
1873	Mai	4,000	62 3 92
	Décembre	5,700	88 35 42
1874	Août	5,700	115 52 60

La surface de 115 hectares correspond actuellement aux 143 hectares seuls arrosables à l'aide du réseau établi ; tout porte à croire que l'irrigation se développera au moins dans la même proportion, à mesure que les artères de distribution seront poussées plus avant. La commission croit, du reste, devoir insister sur ce fait que le développement progressif des irrigations s'est produit par le libre jeu de l'intérêt privé, sans que la ville de Paris intervînt à aucun titre par voie de coercition ou d'expropriation.

De l'étude des faits constatés dans la plaine de Gennevilliers, aussi bien que des considérations théoriques, est donc résultée pour la commission la conviction absolue que le seul remède à l'infection produite en Seine par les eaux des collecteurs consiste dans l'emploi agricole de ces eaux en irrigations, et que le système pratiqué sur un sol perméable comme celui de la presqu'île de Gennevilliers et appliqué aux cultures maraîchères et industrielles ou aux prairies, se prête à une exploitation prolongée sans faire courir aucun risque à la salubrité des localités irriguées.

Application à la totalité des eaux des collecteurs. Projets de la ville de Paris

La commission, s'appuyant sur les faits constatés et sur les principes qui en découlaient naturellement, a dû se préoccuper de savoir comment l'opération en cours d'exécution à l'origine de la plaine de Gennevilliers pouvait se développer et s'appliquer à la totalité des eaux des collecteurs. Ceux de ses membres qui représentaient spécialement l'administration et le conseil municipal de la ville de Paris lui ont fourni les renseignements suivants :

Un premier crédit de 1 million, voté le 2 mars 1872, a permis d'établir le système qui fonctionne aujourd'hui et qui comprend :

Les galeries de dérivation entre la Chapelle et Saint-Ouen (collecteur départemental), entre le collecteur de Clichy et l'usine élévatoire	453,000
La première partie de l'usine élévatoire, y compris acquisition du terrain pour l'usine entière, prise d'eau en Seine, etc.	381,000
Conduite métallique définitive pour traversée de la Seine, aux ponts de Clichy et de Saint-Ouen	166,000
TOTAL	1,000,000

A l'aide d'un second crédit de même importance inscrit au budget de 1874, applicable à des projets approuvés par le conseil municipal dans ses séances des 5 et 20 novembre 1874, il sera incessamment établi sur le territoire de la commune de Gennevilliers un réseau complet comprenant 10,910 mètres de conduites en maçonnerie, de diamètre variant entre 60 centimètres et $1^{m},25$. Ce réseau permettra de porter l'eau d'égout en un point quelconque de la plaine de Gennevilliers, dans la partie comprise entre la Seine et la dépression de terrain qui, sous le nom de Fossé-de-l'Aumône, s'étend

presque en ligne droite de Clichy à Argenteuil. Ces travaux sont estimés 750,000 francs. La surface comprise dans les limites indiquées est de 1,200 à 1,300 hectares, sur lesquels on peut compter 1,000 hectares accessibles aux eaux, défalcation faite des non-valeurs, habitations, chemins, etc. Ces 1,000 hectares exigeront, à la dose reconnue pratique de 50,000 mètres cubes par hectare et par an, 50 millions de mètres cubes, soit la moitié environ du cube total des collecteurs.

Ces 50 millions de mètres cubes seront fournis par la dérivation de Saint-Ouen, par la machine actuelle de Clichy de 150 chevaux et par une nouvelle machine de 250 chevaux, dont le prix d'établissement avec son bâtiment sera de 250,000 francs, chiffre qui absorbera le reste des crédits ouverts en 1874, défalcation faite des 750,000 francs destinés aux conduites maîtresses de distribution. Le système sera complété par la construction d'une cheminée en briques à l'usine, au lieu de la cheminée actuelle qui est provisoire et en tôle (25,000 francs), par l'établissement d'une ligne complète de conduites de 1^{m},10 entre l'usine et l'origine du pont de Clichy, partie où le service est fait actuellement par d'anciennes conduites de 60 centimètres (90,000 francs) et enfin par des travaux de distribution secondaire dans la plaine, évalués à 500,000 francs. Ce seront 615,000 francs à imputer soit au budget de 1875, soit sur les fonds de l'emprunt municipal projeté. L'ensemble de ces travaux, représentant une dépense totale de 2,615,000 francs, assurera le service journalier de 1^{mc},500 à 1^{mc},700, soit de la moitié aux 3/5 du cube total des collecteurs. Les eaux, détournées du fleuve, seront conduites sur le territoire de la commune de Gennevilliers et consacrées à l'irrigation de 1,000 hectares, suivant les principes et les procédés actuels.

La commission a pris acte avec satisfaction des déclarations des représentants de la ville de Paris. Elle a constaté que les fonds nécessaires à l'opération étaient dès à présent engagés pour la plupart et qu'ainsi l'assainissement rationnel du fleuve pouvait être considéré comme certain, au moins pour la moitié des eaux des collecteurs.

La commission s'est alors préoccupée de la seconde moitié des eaux d'égout, dont la disparition du fleuve pouvait seule résoudre complétement la question d'assainissement. Les ingénieurs du service municipal ont fait remarquer que la plaine de Gennevilliers s'étendait vers l'ouest, au delà du Fossé-de-l'Aumône, vers Colombes, Nanterre et Rueil; que ces terrains tous inférieurs au niveau des puits de Clichy et de Saint-Ouen, et par suite accessibles aux eaux, comportaient l'application du système indiqué pour le territoire même de la commune de Gennevilliers; qu'entre les centres habités, tels que Colombes, Nanterre, Rueil et la Seine, la surface arrosable était encore de 1,000 à 1,200 hectares et se prêtait, tant par sa configuration topographique et géologique que par la nature même de ses cultures, à l'absorption et à l'utilisation de la dernière moitié des eaux d'égout; qu'une dépense de 2,385,500 francs, portant à 5 millions la dépense totale nécessaire pour l'assainissement de la Seine, semblait devoir suffire à cette opération; qu'effectivement l'usine exigerait encore trois machines nouvelles, dont une de rechange, soit 750,000 francs; une nouvelle cheminée et de nouvelles conduites, 115,000 francs; des conduites maîtresses en maçonnerie, 750,000 francs; des travaux de distribution secondaire, 500,000 francs, et enfin 270,000 francs de somme à valoir.

A la suite de ces explications, la commission a admis, avec les représentants de la ville de Paris, que cette seconde partie de l'opération semblait aussi praticable que la première. Mais elle exigera évidemment un certain temps pour sa réalisation; les travaux proprement dits, machines, usines, conduites, peuvent évidemment être exécutés à bref délai, et les ingénieurs du service municipal ont mis sous les yeux de la commission un programme sommaire d'après lequel l'ensemble des ouvrages principaux et secondaires serait terminé dans une période de cinq années. Mais, dans une œuvre de cette importance, il convient de toujours compter sur des obstacles imprévus; quoique la ville de Paris offre les eaux d'égout gratuitement aux cultivateurs, quoique les faits déjà acquis actuellement démontrent jusqu'à l'évidence le puissant effet agricole de ces eaux et la plus-value qu'elles donnent aux terrains, les habitudes du cultivateur ou même certains intérêts respectables peuvent rendre plus ou moins lent le développement de l'irrigation, qui constitue seul, en fin de compte, l'œuvre d'assainissement de la Seine.

Rôle de l'épuration chimique dans le système à adopter

A ce point de vue et comme mesure transitoire, la commission s'est demandé si l'épuration chimique ne pouvait intervenir pour assurer au moins la clarification des eaux non traitées par l'irrigation. Mais les considérations développées plus haut lui ont fait écarter cette solution comme imparfaite et coûteuse; on se rappelle qu'appliquée à la totalité des eaux d'égoût, elle exigerait une dépense annuelle de 1 million de francs, rien qu'en réactifs; pour la moitié des eaux, la dépense serait encore de 500,000 francs, soit, par an, un dixième du capital total prévu pour l'irrigation. Mieux vaudrait évidemment appliquer cette somme à la solution définitive et rationnelle et la hâter d'autant. Les travaux pour l'utilisation de la moitié des eaux des collecteurs vont s'exécuter en 1874 et en 1875; l'infection sera déjà considérablement diminuée. La commission a pensé qu'il convenait d'encourager la ville de Paris à poursuivre énergiquement l'œuvre de l'assainissement par la culture, plutôt que de l'entraîner dans des solutions bâtardes et coûteuses, dont l'urgence sera évidemment diminuée par le progrès incessant et plus que probable par l'irrigation.

A la rigueur, à l'extrémité ou à l'origine des artères maîtresses de distribution, l'épuration chimique pourrait être pratiquée lorsque les intempéries de la saison ou les nécessités de la culture laisseraient sans emploi une fraction des eaux élevées par les machines. Mais cette application restera toujours essentiellement intermittente et restreinte.

Extension de l'opération aux terrains domaniaux de la forêt de Saint-Germain

La commission a accueilli avec plus de faveur l'idée émise par un de ses membres. Il a été fait observer qu'il existait dans la forêt de Saint-Germain, entre Maisons-Laffite et Saint-Germain, 1,000 à 1,200 hectares de terrains domaniaux de faible valeur. Ces terrains sont situés entre la Seine et la cote 30, qui est aussi celle de la plaine de Gennevilliers à son origine; ils présentent d'excellentes conditions pour l'absorption et l'utilisation des eaux d'égout; celles-ci pourraient y être amenées, grâce à des travaux qui semblent n'offrir aucune difficulté transcendante. L'État et la ville de Paris pourraient passer une convention qui réglerait les droits respectifs et assurerait une répartition équitable du bénéfice qui résulterait évidemment de l'opération.

La seconde moitié des eaux des collecteurs, dont la première serait toujours destinée à la plaine de Gennevilliers, trouverait là un champ d'application absolument libre et immédiatement utilisable. L'opération de Gennevilliers serait du même coup facilitée; sentant que la ville de Paris pourrait se passer d'eux et refuser les eaux qu'elle leur offre libéralement aujourd'hui, les cultivateurs viendraient sans aucun doute solliciter comme une faveur et payer comme telle l'irrigation qu'ils acceptent trop souvent aujourd'hui d'assez mauvaise grâce, au moins en apparence.

La commission a été frappée de ces considérations, et elle pense qu'il y a lieu de recommander l'étude de la question à l'attention immédiate des ingénieurs de la ville de Paris. Si les études précises démontrent la possibilité pratique de l'opération, il y aurait évidemment lieu d'en tenir compte pour hâter l'assainissement complet du fleuve.

Réserve pour l'intervention de l'État, au cas d'arrêt dans les travaux exécutés par la ville de Paris

La commission insiste en effet tout particulièrement sur l'urgence d'une solution complète. Si, par suite des considérations exposées plus haut et des engagements pris devant elle par les représentants de la ville de Paris, la commission est unanime pour con-

venir qu'il est juste d'accorder un délai moral à l'administration municipale pour mener son œuvre à bonne fin, elle est également unanime pour maintenir énergiquement le principe de l'assainissement obligatoire de la Seine. Le gouvernement constatera les efforts faits par la ville de Paris dans ce sens et tiendra compte des difficultés et des frais considérables de l'opération; mais, au cas, improbable du reste, où les travaux se ralentiraient faute d'allocation de fonds suffisants, l'État conserverait évidemment le droit d'intervenir pour exiger l'achèvement des ouvrages nécessaires à l'assainissement complet du fleuve.

Procédés destinés à faire disparaître les causes secondaires d'altération de la Seine

Il ne reste à la commission qu'à traiter une question qu'elle a déjà signalée dans la première partie de son rapport et dont l'examen sera rendu facile par les développements dans lesquels elle vient d'entrer : il s'agit des eaux industrielles, eaux vannes de vidanges, de teinturerie, d'usines diverses, etc., ainsi que des eaux des égouts riverains de la Seine, non encore réunis aux collecteurs.

Voirie de Bondy. — Disparition de la Seine des eaux vannes de vidange

Parmi ces eaux impures, les plus importantes sont sans contredit celles qui sortent de la voirie de Bondy et qui causent actuellement l'infection spéciale du collecteur départemental qui débouche en Seine, à Saint-Denis. On sait qu'il existe à Paris, route d'Allemagne, un dépotoir municipal, ouvert à toutes les matières de vidange que les vidangeurs ne transportent pas à leurs voiries particulières; du dépotoir, les matières sont refoulées mécaniquement par une conduite dans la forêt de Bondy, où se trouve établie la voirie municipale. Jusqu'en 1870 cette voirie était exploitée, grâce à une série de baux amiables successifs, par la compagnie Richer, aujourd'hui Lesage et C[ie]. Dès cette époque les eaux vannes, après traitement à la voirie, descendaient en Seine par une conduite de retour et le collecteur départemental; l'exploitation, très-imparfaite, laissait ainsi retourner en Seine la moitié de l'azote des matières.

En 1872 par suite d'une adjudication publique, la voirie de Bondy fut dévolue à une compagnie anglaise qui, après avoir dévoré 5 millions de francs dans l'entreprise, a cessé toute exploitation. Les matières de vidange du dépotoir, au lieu d'être refoulées jusqu'à Bondy, sont directement renvoyées en Seine par la conduite de retour et causent l'infection profonde qu'on peut constater à Saint-Denis. La commission ne peut que protester énergiquement contre une pareille situation. Elle s'est demandé si un prompt remède n'était pas applicable : il ne lui appartenait pas, sans doute, de formuler un avis sur les procédés que la ville de Paris ou les industriels pouvaient mettre en œuvre pour effectuer la vidange dans les maisons ou traiter les matières dans les usines; ce sont des points dont le contrôle et la réglementation sont du domaine de la police municipale. Elle a cependant entendu avec intérêt les explications que lui a données à ce sujet l'un de ses membres, M. le directeur des eaux et égouts de la ville de Paris; elle appuie de ses vœux la substitution des tinettes-filtres ou des tuyaux de chute directe au système barbare des fosses; elle a appris avec satisfaction que dans ses usines actuelles la compagnie Lesage soumettait les matières à des opérations en vase clos, qui produisaient le sulfate d'ammoniaque ou la poudrette, sans donner lieu aux inconvénients signalés autrefois à Bondy.

Mais la commission rentrait dans son rôle en cherchant à éloigner de la Seine, soit les matières de vidanges, soit les eaux vannes sortant des usines où ces matières sont traitées. A ce point de vue, elle a trouvé dans l'emploi agricole de ces matières le même avantage qu'elle avait déjà reconnu pour les eaux d'égout. Il est inutile de revenir sur les principes antérieurement posés : la pratique est, du reste, déjà venu confirmer ici l'opinion de la commission. Jusqu'en 1872 un certain nombre de cultivateurs venaient prendre livraison à la voirie de Bondy d'une quantité de matières de vidanges, qui s'est

élevée à 16,000 mètres cubes en 1869; ils l'appliquaient avantageusement sur leurs terrains. Aujourd'hui la compagnie Lesage vient d'ajouter à son usine récente de Choisy-le-Roi une ferme de 136 hectares; sur cette ferme elle applique, par des procédés perfectionnés de culture, soit les matières à l'état naturel, soit les eaux vannes de l'usine. L'emploi de ces dernières, au cas où on pourrait les réunir aux eaux d'égout, se ferait dans des conditions encore plus simples et plus économiques. Or cette solution est facilement réalisable avec les dispositions que la ville de Paris a adoptées pour dériver les eaux du collecteur départemental. Ce collecteur passe, en effet, dans Paris, à une faible distance, soit du dépotoir, soit de la conduite de retour de Bondy. Il est par suite aisé d'y ramener les eaux vannes sorties de la voirie, quel que soit d'ailleurs le système qui sera adopté pour la reprise de l'exploitation de cette voirie. Ces eaux vannes suivront la dérivation de Saint-Ouen et arriveront par l'effet de la pesanteur seule jusque dans la plaine de Gennevilliers où elles seront distribuées en même temps que les eaux d'égout, dès que la canalisation projetée de ce côté sera exécutée. C'est là une opération qui ne saurait offrir de difficulté sérieuse, et la commission insiste tout particulièrement pour que les travaux nécessaires soient compris parmi ceux qui seront exécutés tout d'abord.

Établissements industriels et égouts secondaires

Quant aux établissements industriels divers et aux égouts secondaires qui déversent encore leurs eaux dans la Seine, la commission ne voit aucune raison pour ne pas leur appliquer les principes qui viennent d'être développés. Si une longue tolérance a laissé souvent tomber en désuétude les textes formels des règlements et en particulier les prescriptions de l'arrêt du conseil de 1777; si, en l'absence de procédés pratiques et simples d'épuration, l'administration a hésité à édicter des défenses qu'elle n'aurait guère su comment faire respecter, il semble que les faits acquis aujourd'hui, et spécialement la vaste expérience de Gennevilliers, permettent à l'heure actuelle une application plus sérieuse des règlements. Il va sans dire qu'une simple surveillance des rives de la Seine permet d'empêcher la projection directe de débris solides et de cadavres d'animaux. Dans un grand nombre de cas, la généralisation du système des collecteurs permettrait de supprimer les bouches secondaires qui se déversent encore en Seine; c'est ainsi que la ville de Paris a le projet de supprimer par deux collecteurs latéraux à la Seine les égouts de Grenelle, d'Auteuil, du quai d'Austerlitz, de Bercy et par des syphons ceux de la cité ou de l'île Saint-Louis. Il serait à désirer que des ouvrages analogues fussent établis dans la banlieue et vinssent intercepter les eaux impures avant leur déversement en Seine; les eaux pourraient alors subir un traitement analogue à celui qui a été indiqué ci-dessus pour les collecteurs de Paris.

Lorsque des établissements industriels se trouvent isolés et ne peuvent envoyer leurs eaux vannes dans une galerie publique voisine, rien ne les empêche d'appliquer les procédés suffisamment économiques auxquels conduit la science moderne et spécialement le système agricole d'assainissement; dans le département du Nord, cette solution est déjà pratiquée dans un certain nombre de cas; elle était préconisée en 1859, ainsi que le drainage dans le cas de sols imperméables, par M. Wurtz, dans un remarquable rapport sur les résidus de distillerie. M. Dailly traite ainsi depuis longtemps les résidus de sa distillerie, à Trappes; M. Gérardin a fait également intervenir l'action du sol drainé pour épurer des résidus de féculerie et autres établissements industriels a Gonesse, Aubervilliers, Choisy. Les commissaires officiels de l'enquête anglaise sur la pollution des rivières sont arrivés de leur côté à la même conclusion.

Partout l'action combinée du sol et de la végétation se présente comme la solution complète et rationnelle de l'assainissement des rivières.

Par un pareil procédé, les substances qui portaient atteinte à la salubrité publique se trouvent transformées en source de richesse agricole; non-seulement le mal disparait, mais il devient un bien. L'hygiène est sauvegardée, l'agriculture profite et la grande loi naturelle de la restitution est satisfaite.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

En résumé, les considérations et observations consignées dans le présent rapport ont conduit la commission à adopter les conclusions suivantes.

En ce qui concerne l'état actuel des eaux de la Seine :

1° La seule inspection de l'état apparent de la rivière conduit aux résultats suivants :

En amont de Paris, les eaux de la rivière sont dans un état général de pureté satisfaisant.

Dans la traversée de la capitale, et en aval jusqu'à Clichy, l'altération générale des eaux par les déjections provenant d'usines ou d'égouts est pour l'instant peu sensible. Mais à partir de l'égout collecteur qui débouche dans la Seine, à Clichy, les eaux qui longent la rive droite passent brusquement à un état d'infection repoussant, et cet état est considérablement aggravé à partir de Saint-Denis jusqu'à l'extrémité de l'île Saint-Denis, par les eaux fétides que déverse le collecteur départemental chargé des eaux vannes de la voirie de Bondy, et des usines d'Aubervilliers et Saint-Denis.

Cette pollution des eaux par les déjections des égouts collecteurs, très-marquée dans le bras droit dans les limites qui viennent d'être indiquées, s'étend aussi, mais à un degré relativement faible, au bras gauche.

A partir d'Argenteuil, l'altération des eaux décroît assez rapidement. Elle est encore sensible à la hauteur de Marly, et ne disparaît complétement qu'en aval de Meulan.

Il existe au fond de la rivière, à partir de la bouche des égouts collecteurs, des dépôts de matières infectes en fermentation qui dégagent incessamment des bulles de gaz d'hydrogène carboné et d'hydrogène sulfuré. Ces bulles, généralement très-petites, prennent souvent pendant l'été un volume considérable pouvant atteindre environ un mètre de diamètre.

Les draguages exécutés par le service de la navigation pour l'enlèvement de ces dépôts, dans la saison où ils peuvent être pratiqués sans devenir eux-mêmes une cause d'insalubrité, sont insuffisants pour faire face à l'enlèvement de ces dépôts, dont le volume s'accroît annuellement.

2° Indépendamment du trouble apparent des eaux, leur altération a pu être caractérisée, d'une part, par la proportion des matières fermentescibles qui y sont en suspension ou en dissolution, et, d'autre part, par la proportion d'oxygène libre qu'elles tiennent en dissolution.

D'après les expériences mentionnées dans ce rapport, on doit considérer que, depuis le débouché de l'égout collecteur de Clichy jusqu'à l'extrémité de l'île Saint-Denis, les eaux du bras droit ne peuvent servir ni à l'alimentation des hommes et des animaux, ni à la cuisson des aliments, ni à d'autres usages domestiques, et qu'elles seraient même impropres au lavage des voies publiques, sans une décantation ou une épuration préalable.

Depuis Argenteuil jusqu'à Marly et au delà, l'eau devient moins impure ; elle est susceptible de se prêter à une grande partie des usages courants auxquels peuvent la consacrer les riverains ; sans être impropre à l'alimentation, elle a encore une aération insuffisante et elle est chargée d'une assez forte proportion de substances minérales azotées.

En aval de Meulan et de Mantes, les eaux de la Seine, dépouillées des troubles provenant des égouts de Paris et régénérées par l'action de l'oxygène de l'atmosphère, redeviennent propres à l'alimentation et aux usages domestiques.

En ce qui concerne les mesures à prendre :

1° D'une manière générale, il y a lieu d'interdire en principe, par application de l'ordonnance du roi du 20 février 1773 et de l'arrêt du conseil du 27 juin 1777, de jeter

dans la Seine des eaux ou des immondices et déjections quelconques qui sont de nature à rendre ses eaux insalubres et impropres aux usages domestiques.

2° Pour remédier à l'infection de la Seine par les eaux des collecteurs de Paris, le moyen le plus efficace, le plus économique et le plus pratique consiste dans le déversement de ces eaux par irrigations sur un sol suffisamment perméable; des cultures très-diverses, surtout les cultures maraîchères, trouvent dans ces eaux l'humidité et l'engrais qui leur sont nécessaires.

Les expériences faites dans la plaine de Gennevilliers sont entièrement concluantes pour démontrer non-seulement la puissante végétation produite par les arrosages, mais encore leur innocuité sous le rapport de la salubrité, ainsi que la parfaite épuration des eaux qui arrivent à la rivière après avoir traversé un sous-sol naturellement perméable ou convenablement drainé. Il est d'ailleurs prouvé que les matières en suspension sont retenues dans la couche supérieure du sol cultivé; tout porte à croire que les matières organiques azotées sont absorbées par la végétation, ou oxydées par le sous-sol, qui conserve indéfiniment sa perméabilité.

3° La commission estime que la totalité des eaux d'égout de la ville de Paris, dont le volume, après la mise en service de la dérivation de la Vanne, sera porté à environ 100 millions de mètres cubes par an, pourra être employée sur la surface d'environ 2,000 hectares qui est propre à cet usage dans la presqu'île de Gennevilliers.

Toutefois il peut être utile et convenable de porter une partie des eaux d'égout sur d'autres terrains, et pour cette éventualité la partie de la forêt domaniale de Saint-Germain qui est voisine de la Seine semble devoir offrir un emplacement convenable. L'étude de cette question paraît devoir être recommandée dès ce moment aux ingénieurs de la ville de Paris.

En tout cas il importe de mettre promptement à exécution le projet qui est soumis au conseil municipal de Paris pour l'emploi d'un volume d'eau de 50 millions de mètres cubes par an sur une surface d'environ 1,000 hectares sur le territoire de la commune de Gennevilliers.

4° Par l'emploi prochain d'au moins la moitié des eaux d'égout dans la plaine de Gennevilliers au moyen des travaux qui vont être entrepris, l'état de la Seine éprouvera une amélioration sensible, mais qui sera loin d'être suffisante. Pour l'assainissement complet de la rivière, il faut que les eaux d'égout en soient détournées en totalité, et il importe que la ville de Paris hâte le plus possible l'exécution des travaux complémentaires.

5° Quant à l'épuration par les procédés chimiques, et en particulier par le sulfate d'alumine, la commission est d'avis qu'elle ne saurait constituer une solution complète et pratique de la question; l'application de ces procédés à la totalité des eaux d'égout entraînerait à des dépenses et à des difficultés d'exploitation qui ne sont aucunement en rapport avec les résultats obtenus soit au point de vue de la salubrité, soit au point de vue agricole; l'épuration chimique ne saurait être appliquée que temporairement et sur une échelle restreinte, comme expédient complémentaire, dans quelques cas particuliers.

6° Les draguages pour l'enlèvement au fond de la rivière des dépôts formés par les déjections des égouts doivent être continués avec toute l'activité que comportent les précautions commandées par la salubrité.

7° Les eaux provenant de la voirie de Bondy étant la principale cause d'infection de l'égout départemental qui débouche en Seine à Saint-Denis, il est urgent que cet établissement reçoive une transformation qui mette fin aux graves inconvénients qu'il présente. Mais dès aujourd'hui les eaux qui en découlent peuvent, sans grande dépense, et par la seule action de la gravité, être amenées dans la plaine de Gennevilliers; les travaux nécessaires à cet effet doivent être compris parmi ceux à exécuter immédiatement.

8° Bien que les eaux provenant, soit des usines et bateaux à lessive, soit des égouts secondaires, débouchent encore en Seine et contribuent quant à présent, à un degré se-

condaire, à l'altération des eaux de la Seine, elles sont souvent très-infectes, et leur écoulement dans la rivière n'est pas sans avoir des inconvénients réels. La commission appelle l'attention de l'administration sur une exécution plus efficace des règlements qui prescrivent l'épuration préalable de ces eaux, épuration rendue aujourd'hui possible par des procédés suffisamment économiques, et spécialement par le système rationnel de l'emploi agricole. Il importe également de faire mieux observer les règlements qui interdisent de jeter des corps morts ou des immondices quelconques dans les cours d'eau.

Paris, le 12 décembre 1874.

APPENDICE

Nous avons réuni dans cet Appendice les tables les plus utiles pour les distributions d'eau et de nombreux exemples qui indiquent nettement la marche à suivre pour l'emploi, soit de ces tables, soit des formules établies au chapitre premier.

TABLE I

La table I donne les vitesses en fonction des hauteurs de chute, vitesses calculées par la formule

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Cette table se trouve déjà dans notre première partie du *Traité des eaux*, mais elle est d'un usage si fréquent que nous avons cru devoir la reproduire ici. — L'usage s'en comprend à première vue; c'est une table à simple entrée, dans laquelle les vitesses sont placées en regard des hauteurs de chute correspondantes :

TABLE DE LA VITESSE v DUE A UNE HAUTEUR DE CHUTE h.

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
0,001	0,140	0,45	2,971	0,98	4,384	1,51	5,443	2,04	6,326
0,002	0,198	0,46	3,004	0,99	4,407	1,52	5,461	2,05	6,341
0,003	0,243	0,47	3,037	1,00	4,429	1,53	5,479	2,06	6,357
0,004	0,280	0,48	3,069	1,01	4,451	1,54	5,496	2,07	6,372
0,005	0,313	0,49	3,100	1,02	4,473	1,55	5,514	2,08	6,388
0,006	0,343	0,50	3,132	1,03	4,495	1,56	5,532	2,09	6,403
0,007	0,370	0,51	3,163	1,04	4,517	1,57	5,550	2,10	6,418
0,008	0,395	0,52	3,194	1,05	4,539	1,58	5,567	2,11	6,434
0,009	0,420	0,53	3,224	1,06	4,560	1,59	5,585	2,12	6,449
0,01	0,443	0,54	3,253	1,07	4,582	1,60	5,603	2,13	6,464
0,02	0,626	0,55	3,285	1,08	4,603	1,61	5,620	2,14	6,479
0,03	0,767	0,56	3,314	1,09	4,624	1,62	5,637	2,15	6,494
0,04	0,886	0,57	3,344	1,10	4,645	1,63	5,655	2,16	6,510
0,05	0,990	0,58	3,373	1,11	4,666	1,64	5,672	2,17	6,525
0,06	1,085	0,59	3,402	1,12	4,687	1,65	5,690	2,18	6,540
0,07	1,172	0,60	3,431	1,13	4,708	1,66	5,707	2,19	6,555
0,08	1,253	0,61	3,459	1,14	4,729	1,67	5,724	2,20	6,570
0,09	1,329	0,62	3,488	1,15	4,750	1,68	5,741	2,21	6,584
0,10	1,401	0,63	3,516	1,16	4,770	1,69	5,758	2,22	6,599
0,11	1,468	0,64	3,543	1,17	4,790	1,70	5,775	2,23	6,614
0,12	1,534	0,65	3,571	1,18	4,811	1,71	5,792	2,24	6,629
0,13	1,597	0,66	3,598	1,19	4,831	1,72	5,809	2,25	6,644
0,14	1,657	0,67	3,625	1,20	4,852	1,73	5,826	2,26	6,658
0,15	1,715	0,68	3,652	1,21	4,872	1,74	5,842	2,27	6,673
0,16	1,772	0,69	3,679	1,22	4,892	1,75	5,859	2,28	6,688
0,17	1,826	0,70	3,706	1,23	4,913	1,76	5,876	2,29	6,703
0,18	1,879	0,71	3,732	1,24	4,933	1,77	5,893	2,30	6,717
0,19	1,931	0,72	3,758	1,25	4,953	1,78	5,909	2,31	6,732
0,20	1,981	0,73	3,784	1,26	4,972	1,79	5,926	2,32	6,746
0,21	2,030	0,74	3,810	1,27	4,991	1,80	5,942	2,33	6,761
0,22	2,078	0,75	3,836	1,28	5,011	1,81	5,959	2,34	6,775
0,23	2,124	0,76	3,861	1,29	5,031	1,82	5,975	2,35	6,790
0,24	2,170	0,77	3,886	1,30	5,050	1,83	5,992	2,36	6,804
0,25	2,215	0,78	3,911	1,31	5,069	1,84	6,008	2,37	6,819
0,26	2,259	0,79	3,936	1,32	5,089	1,85	6,024	2,38	6,833
0,27	2,301	0,80	3,961	1,33	5,108	1,86	6,041	2,39	6,847
0,28	2,344	0,81	3,986	1,34	5,127	1,87	6,057	2,40	6,862
0,29	2,385	0,82	4,011	1,35	5,146	1,88	6,073	2,41	6,876
0,30	2,426	0,83	4,035	1,36	5,165	1,89	6,089	2,42	6,890
0,31	2,466	0,84	4,059	1,37	5,184	1,90	6,105	2,43	6,904
0,32	2,506	0,85	4,083	1,38	5,203	1,91	6,122	2,44	6,919
0,33	2,544	0,86	4,107	1,39	5,222	1,92	6,138	2,45	6,933
0,34	2,582	0,87	4,131	1,40	5,241	1,93	6,154	2,46	6,947
0,35	2,620	0,88	4,155	1,41	5,259	1,94	6,170	2,47	6,961
0,36	2,658	0,89	4,178	1,42	5,278	1,95	6,186	2,48	6,975
0,37	2,694	0,90	4,202	1,43	5,297	1,96	6,202	2,49	6,989
0,38	2,730	0,91	4,225	1,44	5,315	1,97	6,217	2,50	7,003
0,39	2,766	0,92	4,248	1,45	5,333	1,98	6,232	2,51	7,017
0,40	2,801	0,93	4,271	1,46	5,351	1,99	6,248	2,52	7,031
0,41	2,836	0,94	4,294	1,47	5,370	2,00	6,264	2,53	7,045
0,42	2,870	0,95	4,317	1,48	5,388	2,01	6,279	2,54	7,059
0,43	2,904	0,96	4,340	1,49	5,406	2,02	6,295	2,55	7,073
0,44	2,938	0,97	4,362	1,50	5,425	2,03	6,311	2,56	7,087

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
2,57	7,101	3,14	7,849	3,71	8,531	4,28	9,163	4,85	9,754
2,58	7,114	3,15	7,861	3,72	8,543	4,29	9,174	4,86	9,764
2,59	7,128	3,16	7,873	3,73	8,554	4,30	9,185	4,87	9,774
2,60	7,142	3,17	7,886	3,74	8,566	4,31	9,195	4,88	9,784
2,61	7,156	3,18	7,898	3,75	8,577	4,32	9,206	4,89	9,794
2,62	7,169	3,19	7,911	3,76	8,588	4,33	9,217	4,90	9,804
2,63	7,183	3,20	7,923	3,77	8,600	4,34	9,227	4,91	9,814
2,64	7,197	3,21	7,936	3,78	8,611	4,35	9,238	4,92	9,824
2,65	7,210	3,22	7,948	3,79	8,623	4,36	9,248	4,93	9,834
2,66	7,224	3,23	7,960	3,80	8,634	4,37	9,259	4,94	9,844
2,67	7,237	3,24	7,973	3,81	8,645	4,38	9,270	4,95	9,854
2,68	7,251	3,25	7,985	3,82	8,657	4,39	9,280	4,96	9,864
2,69	7,265	3,26	7,997	3,83	8,668	4,40	9,291	4,97	9,874
2,70	7,278	3,27	8,009	3,84	8,679	4,41	9,301	4,98	9,884
2,71	7,291	3,28	8,022	3,85	8,691	4,42	9,312	4,99	9,894
2,72	7,305	3,29	8,034	3,86	8,702	4,43	9,322	5,00	9,904
2,73	7,318	3,30	8,046	3,87	8,713	4,44	9,333	5,25	10,149
2,74	7,332	3,31	8,058	3,88	8,725	4,45	9,343	5,50	10,387
2,75	7,345	3,32	8,070	3,89	8,736	4,46	9,354	5,75	10,621
2,76	7,358	3,33	8,082	3,90	8,747	4,47	9,364	6,00	10,849
2,77	7,372	3,34	8,095	3,91	8,758	4,48	9,375	6,25	11,073
2,78	7,385	3,35	8,107	3,92	8,769	4,49	9,385	6,50	11,292
2,79	7,398	3,36	8,119	3,93	8,780	4,50	9,396	6,75	11,507
2,80	7,411	3,37	8,131	3,94	8,792	4,51	9,406	7,00	11,718
2,81	7,425	3,38	8,143	3,95	8,803	4,52	9,417	7,25	11,926
2,82	7,437	3,39	8,155	3,96	8,814	4,53	9,427	7,50	12,130
2,83	7,451	3,40	8,167	3,97	8,825	4,54	9,437	7,75	12,330
2,84	7,464	3,41	8,179	3,98	8,836	4,55	9,448	8,00	12,528
2,85	7,477	3,42	8,191	3,99	8,847	4,56	9,458	8,25	12,722
2,86	7,490	3,43	8,203	4,00	8,858	4,57	9,468	8,50	12,913
2,87	7,503	3,44	8,215	4,01	8,869	4,58	9,479	8,75	13,102
2,88	7,517	3,45	8,227	4,02	8,880	4,59	9,489	9,00	13,288
2,89	7,530	3,46	8,239	4,03	8,892	4,60	9,500	9,25	13,471
2,90	7,543	3,47	8,251	4,04	8,903	4,61	9,510	9,50	13,652
2,91	7,556	3,48	8,263	4,05	8,914	4,62	9,520	9,75	13,830
2,92	7,569	3,49	8,274	4,06	8,925	4,63	9,530	10,00	14,006
2,93	7,582	3,50	8,286	4,07	8,936	4,64	9,541	11,00	14,690
2,94	7,594	3,51	8,298	4,08	8,946	4,65	9,551	12,00	15,343
2,95	7,607	3,52	8,310	4,09	8,957	4,66	9,561	13,00	15,970
2,96	7,620	3,53	8,322	4,10	8,968	4,67	9,572	14,00	16,572
2,97	7,633	3,54	8,333	4,11	8,979	4,68	9,582	15,00	17,154
2,98	7,646	3,55	8,345	4,12	8,990	4,69	9,592	16,00	17,717
2,99	7,659	3,56	8,357	4,13	9,001	4,70	9,602	17,00	18,257
3,00	7,672	3,57	8,369	4,14	9,012	4,71	9,612	18,00	18,791
3,01	7,684	3,58	8,380	4,15	9,023	4,72	9,623	19,00	19,306
3,02	7,697	3,59	8,392	4,16	9,034	4,73	9,633	20,00	19,808
3,03	7,710	3,60	8,404	4,17	9,045	4,74	9,643	21,00	20,297
3,04	7,722	3,61	8,415	4,18	9,055	4,75	9,653	22,00	20,775
3,05	7,735	3,62	8,427	4,19	9,066	4,76	9,663	23,00	21,242
3,06	7,748	3,63	8,439	4,20	9,077	4,77	9,673	24,00	21,698
3,07	7,760	3,64	8,450	4,21	9,[illegible]8	4,78	9,684	25,00	22,146
3,08	7,773	3,65	8,462	4,22	9,099	4,79	9,694	26,00	22,584
3,09	7,786	3,66	8,474	4,23	9,109	4,80	9,704	27,00	23,015
3,10	7,798	3,67	8,485	4,24	9,120	4,81	9,714	28,00	23,437
3,11	7,811	3,68	8,497	4,25	9,131	4,82	9,724	29,00	23,852
3,12	7,823	3,69	8,508	4,26	9,142	4,83	9,734	30,00	24,260
3,13	7,836	3,70	8,520	4,27	9,152	4,84	9,744	31,00	24,661

HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.	HAUTEURS de chute.	VITESSES correspondantes.
m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.	m.
32	25,055	54	32,548	76	38,613	98	43,847	200	62,638
33	25,444	55	32,848	77	38,866	99	44,070	205	63,416
34	25,826	56	33,145	78	39,117	100	44,292	210	64,185
35	26,203	57	33,440	79	39,367	105	45,386	215	64,944
36	26,575	58	33,732	80	39,616	110	46,454	220	65,695
37	26,942	59	34,021	81	39,863	115	47,498	225	66,438
38	27,303	60	34,308	82	40,108	120	48,519	230	67,171
39	27,660	61	34,593	83	40,352	125	49,520	235	67,898
40	28,013	62	34,875	84	40,594	130	50,500	240	68,616
41	28,361	63	35,155	85	40,835	135	51,462	245	69,328
42	28,704	64	35,433	86	41,074	140	52,407	250	70,031
43	29,044	65	35,709	87	41,313	145	53,334	255	70,728
44	29,380	66	35,983	88	41,549	150	54,246	260	71,418
45	29,712	67	36,254	89	41,785	155	55,143	265	72,102
46	30,040	68	36,524	90	42,019	160	56,025	270	72,780
47	30,365	69	36,791	91	42,252	165	56,894	275	73,450
48	30,686	70	37,057	92	42,483	170	57,749	280	74,114
49	31,004	71	37,321	93	42,713	175	58,592	285	74,773
50	31,329	72	37,583	94	42,942	180	59,424	290	75,426
51	31,631	73	37,843	95	43,170	185	60,243	295	76,074
52	31,939	74	38,101	96	43,397	190	61,052	300	76,716
53	32,245	75	38,358	97	43,622	195	61,850		

TABLE II

La table II donne diverses fonctions du rayon et le coefficient de résistance b_1 dans les tuyaux dont le rayon varie de $0^m,01$ à $0^m,75$.

Les fonctions du rayon sont la racine carrée, la cinquième puissance, la racine carrée de la cinquième puissance, l'inverse du rayon et l'inverse de sa cinquième puissance. Toutes ces fonctions se rencontrent dans les diverses formules relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux; toutes les fois qu'on aura à se servir d'une de ces formules, la présente table facilitera singulièrement le calcul.

Elle donne encore : 1° la section du tuyau exprimée en mètres carrés ; 2° la valeur du coefficient b_1. Cette valeur s'applique à des tuyaux depuis longtemps en usage ; c'est le seul cas que l'on doive considérer dans la pratique. La valeur de b_1 est donc le double de celle inscrite aux tables de Darcy, puisque la résistance est moitié moindre dans les tuyaux neufs que dans les tuyaux depuis longtemps en usage.

TABLE DE DIVERSES FONCTIONS DU RAYON

ET DE LA VALEUR DU COEFFICIENT b_1 POUR DES TUYAUX DEPUIS LONGTEMPS EN SERVICE

(Ce coefficient est double de celui qui est relatif aux tuyaux neufs.)

RAYONS	RACINE CARRÉE DU RAYON $\sqrt{r}$	CARRÉ DU RAYON r^2	CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON r^5	RACINE CARRÉE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\sqrt{r^5}$	INVERSE DU RAYON $\frac{1}{r}$	INVERSE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\frac{1}{r^5}$	SECTION DU TUYAU (MÈTRES CARRÉS)	VALEURS DU COEFFICIENT b_1
mètres 0,01	0,100	0,0001	0,0000000001	0,000010	100,00	10000000000	0,000314	0,002308
0,02	0,141	0,0004	0,0000000003	0,000057	50,00	312500000	0,00126	0,001660
0,027	0,167	0,0007	0,0000000014	0,000120	37,03	70388636	0,00143	0,001492
0,03	0,173	0,0009	0,0000000024	0,000155	33,33	41152270	0,00283	0,001444
0,04	0,200	0,0016	0,0000000102	0,000320	25,00	9765625	0,00503	0,001332
0,05	0,224	0,0025	0,0000000312	0,000559	20,00	3200000	0,00785	0,001272
0,054	0,232	0,0029	0,0000000459	0,000678	18,52	2177866	0,00916	0,001252
0,06	0,245	0,0036	0,0000000778	0,000882	16,67	1286009	0,0113	0,001228
0,07	0,265	0,0049	0,0000001681	0,001296	14,29	594990	0,0154	0,001196
0,08	0,283	0,0064	0,0000005277	0,001810	12,50	305175	0,0201	0,001172
0,081	0,285	0,0066	0,0000003486	0,001867	12,35	284015	0,0206	0,001172
0,09	0,300	0,0081	0,0000005901	0,002430	11,11	169351	0,0264	0,001156
0,10	0,316	0,0100	0,0000010000	0,003162	10,00	100000	0,0314	0,001142
0,108	0,329	0,0117	0,0000014683	0,003832	9,26	68105	0,0366	0,001132
0,11	0,332	0,0121	0,0000016105	0,004013	9,09	62092	0,0380	0,001130
0,12	0,346	0,0144	0,0000024883	0,004988	8,33	40187	0,0452	0,001121
0,13	0,361	0,0169	0,0000037129	0,006093	7,69	26932	0,0531	0,001112
0,135	0,367	0,0182	0,0000044816	0,006694	7,41	22313	0,0573	0,001108
0,14	0,374	0,0196	0,0000053782	0,007334	7,14	18593	0,0616	0,001104
0,15	0,387	0,0225	0,0000075937	0,008714	6,67	13168	0,0707	0,001100
0,16	0,400	0,0256	0,0000104857	0,010240	6,25	9536	0,0804	0,001100
0,162	0,402	0,0262	0,0000111543	0,010561	6,17	8965	0,0830	0,001100
0,17	0,412	0,0289	0,0000141985	0,011916	5,88	7042	0,0908	0,001090
0,18	0,424	0,0324	0,0000188956	0,013746	5,55	5292	0,1018	0,001084
0,19	0,436	0,0361	0,0000266610	0,015735	5,26	3750	0,1134	0,001082
0,20	0,447	0,0400	0,0000320000	0,017888	5,00	3125	0,1257	0,001078
0,21	0,458	0,0441	0,0000408410	0,020209	4,76	2448	0,1385	0,001074
0,216	0,463	0,0467	0,0000460560	0,021587	4,63	2171	0,145	0,001072

RAYONS	RACINE CARRÉE DU RAYON $\sqrt{r}$	CARRÉ DU RAYON r^2	CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON r^5	RACINE CARRÉE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\sqrt{r^5}$	INVERSE DU RAYON $\frac{1}{r}$	INVERSE DE LA CINQUIÈME PUISSANCE DU RAYON $\frac{1}{r^5}$	SECTION DU TUYAU (MÈTRES CARRÉS)	VALEURS DU COEFFICIENT b_1
mètres. 0,22	0,469	0,0484	0,000515363	0,022702	4,55	1940	0,152	0,001072
0,23	0,480	0,0529	0,000643634	0,025370	4,35	1553	0,166	0,001070
0,24	0,490	0,0576	0,000796	0,0282	4,17	1255	0,181	0,001066
0,25	0,500	0,0625	0,000977	0,0312	4,00	1024	0,196	0,001064
0,26	0,510	0,0676	0,001188	0,0345	3,85	841	0,212	0,001063
0,27	0,520	0,0729	0,001435	0,0379	3,70	697	0,229	0,001062
0,28	0,529	0,0784	0,001721	0,0415	3,57	581	0,246	0,001060
0,29	0,538	0,0841	0,002051	0,0453	3,45	487	0,264	0,001058
0,30	0,547	0,0900	0,002410	0,0495	3,33	418	0,283	0,001056
0,31	0,556	0,0961	0,002863	0,0535	3,23	349	0,302	0,001054
0,32	0,565	0,102	0,003355	0,0579	3,13	298	0,322	0,001052
0,325	0,570	0,106	0,003626	0,0602	3,07	276	0,332	0,001052
0,33	0,574	0,109	0,003914	0,0626	3,03	256	0,342	0,001051
0,34	0,583	0,116	0,004544	0,0675	2,94	220	0,363	0,001050
0,35	0,592	0,122	0,005252	0,0725	2,86	190	0,385	0,001050
0,36	0,600	0,130	0,006047	0,0778	2,78	165	0,407	0,001049
0,37	0,608	0,137	0,006934	0,0833	2,70	144	0,430	0,001048
0,38	0,616	0,144	0,007924	0,0890	2,63	126	0,454	0,001047
0,39	0,624	0,152	0,009022	0,0950	2,57	111	0,478	0,001047
0,40	0,632	0,160	0,010240	0,101	2,50	98	0,503	0,001046
0,41	0,640	0,168	0,011586	0,108	2,44	86	0,528	0,001045
0,42	0,648	0,176	0,013069	0,114	2,38	77	0,554	0,001044
0,43	0,656	0,185	0,014701	0,121	2,33	68	0,581	0,001044
0,44	0,663	0,194	0,016492	0,128	2,27	60,64	0,608	0,001043
0,45	0,670	0,202	0,018453	0,136	2,22	54,19	0,636	0,001042
0,46	0,678	0,212	0,020596	0,144	2,17	48,55	0,665	0,001041
0,47	0,686	0,221	0,022935	0,151	2,13	43,60	0,694	0,001040
0,48	0,693	0,230	0,025480	0,160	2,08	39,25	0,724	0,001040
0,49	0,700	0,240	0,028248	0,168	2,04	35,40	0,754	0,001039
0,50	0,707	0,250	0,031250	0,177	2,00	32,00	0,785	0,001038
0,55	0,742	0,302	0,0503	0,224	1,82	19,87	0,950	0,001034
0,60	0,775	0,360	0,0778	0,279	1,66	12,86	1,13	0,001030
0,75	0,866	0,563	0,237	0,487	1,33	4,21	1,77	0,001

TABLE III

Table donnant les charges, les vitesses et les débits correspondants pour des tuyaux d'un diamètre variant entre $0^m,01$ et $1^m,50$, ces tuyaux étant depuis longtemps en service.

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE									
	Diamètre 0m,01 Surface 0mq,000079		Diamètre 0m,02 Surface 0mq,000314		Diamètre 0m,027 Surface 0mq,000573		Diamètre 0m,03 Surface 0mq,000707		Diamètre 0m,04 Surface 0mq,00126	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,112	0,00000095	0,021	0,0000066	0,026	0,0000149	0,028	0,0000198	0,034	0,000043
0,0002	0,013	0,00000103	00029	0,0000091	0,036	0,0000206	0,039	0,0000276	0,048	0,000060
0,0003	0,019	0,0000015	0,035	0,0000110	0,044	0,0000252	0,048	0,0000339	0,058	0,000073
0,0004	0,023	0,0000018	0,041	0,0000129	0,052	0,0000298	0,056	0,0000396	0,069	0,000087
0,0005	0,026	0,0000021	0,045	0,0000141	0,057	0,0000307	0,062	0,0000438	0,073	0,000094
0,0006	0,027	0,0000021	0,049	0,0000154	0,062	0,0000355	0,067	0,0000474	0,082	0,000103
0,0007	0,029	0,0000023	0,054	0,0000169	0,067	0,0000384	0,073	0,0000516	0,089	0,000112
0,0008	0,033	0,0000026	0,058	0,0000182	0,072	0,0000413	0,078	0,0000551	0,096	0,000121
0,0009	0,035	0,0000028	0,062	0,0000195	0,078	0,0000447	0,084	0,0000594	0,103	0,000130
0,001	0,037	0,0000029	0,066	0,0000207	0,083	0,0000476	0,090	0,0000636	0,110	0,000139
0,002	0,053	0,0000042	0,093	0,0000292	0,117	0,0000670	0,126	0,0000891	0,154	0,000194
0,003	0,064	0,0000051	0,113	0,0000355	0,142	0,0000814	0,154	0,000109	0,189	0,000238
0,004	0,074	0,0000058	0,130	0,0000408	0,163	0,0000934	0,176	0,000124	0,216	0,000272
0,005	0,083	0,0000066	0,146	0,0000458	0,184	0,000105	0,199	0,000141	0,244	0,000307
0,006	0,090	0,0000071	0,155	0,0000487	0,199	0,000114	0,216	0,000153	0,264	0,000333
0,007	0,098	0,0000077	0,173	0,0000543	0,218	0,000125	0,235	0,000166	0,288	0,000363
0,008	0,104	0,0000082	0,185	0,0000581	0,231	0,000132	0,249	0,000176	0,305	0,000384
0,009	0,111	0,0000088	0,196	0,0000615	0,246	0,000141	0,266	0,000188	0,326	0,000411
0,01	0,117	0,0000092	0,206	0,0000647	0,259	0,000148	0,280	0,000198	0,343	0,000432
0,015	0,143	0,0000113	0,251	0,0000788	0,316	0,000181	0,342	0,000242	0,418	0,000527
0,02	0,165	0,0000130	0,290	0,0000911	0,365	0,000209	0,395	0,000279	0,484	0,000610
0,025	0,185	0,0000146	0,325	0,000102	0,409	0,000234	0,442	0,000312	0,542	0,000683
0,03	0,202	0,0000159	0,356	0,000112	0,448	0,000257	0,484	0,000342	0,593	0,000747
0,035	0,219	0,0000173	0,385	0,000121	0,484	0,000277	0,524	0,000370	0,641	0,000808
0,04	0,234	0,0000185	0,412	0,000129	0,518	0,000297	0,560	0,000396	0,686	0,000864
0,045	0,248	0,0000196	0,437	0,000137	0,549	0,000315	0,594	0,000420	0,727	0,000916
0,05	0,261	0,0000206	0,459	0,000144	0,578	0,000331	00624	0,000441	0,765	0,000964
0,06	0,287	0,0000226	0,505	0,000159	0,635	0,000364	0,686	0,000485	0,834	0,00105
0,07	0,310	0,0000245	0,546	0,000171	0,686	0,000393	0,742	0,000525	0,909	0,00115
0,08	0,331	0,0000261	0,583	0,000183	0,733	0,000420	0,792	0,000560	0,973	0,00123
0,09	0,351	0,0000277	0,618	0,000194	0,777	0,000445	0,840	0,000594	1,029	0,00130
0,10	0,370	0,0000292	0,651	0,000204	0,818	0,000469	0,885	0,000626	1,084	0,00137
0,12	0,405	0,0000320	0,713	0,000224	0,896	0,000513	0,969	0,000685	1,187	0,00150
0,15	0,453	0,0000358	0,797	0,000250	1,002	0,000574	1,084	0,000766	1,327	0,00167
0,20	0,523	0,0000413	0,921	0,000289	1,158	0,000664	1,252	0,001084	1,533	0,00193

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET							
	DIAMÈTRE 0m,05 SURFACE 0mq,00196		DIAMÈTRE 0m,054 SURFACE 0mq,00229		DIAMÈTRE 0m,06 SURFACE 0mq,00285		DIAMÈTRE 0m,07 SURFACE 0mq,00385	
	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT
0,0001	0,040	0,000078	0,042	0,000096	0,045	0,00013	0,050	0,00019
0,0002	0,056	0,00011	0,059	0,00014	0,063	0,00018	0,070	0,00027
0,0003	0,068	0,00013	0,072	0,00016	0,077	0,00022	0,085	0,00033
0,0004	0,080	0,00016	0,084	0,00019	0,090	0,00025	0,100	0,00038
0,0005	0,088	0,00017	0,093	0,00021	0,099	0,00028	0,110	0,00042
0,0006	0,096	0,00019	0,101	0,00023	0,108	0,00031	0,120	0,00046
0,0007	0,104	0,00020	0,109	0,00025	0,117	0,00033	0,129	0,0 049
0,0008	0,112	0,00022	0,118	0,00027	0,126	0,00036	0,139	0,00053
0,0009	0,120	0,00024	0,126	0,00029	0,135	0,00038	0,149	0,00057
0,001	0,128	0,00025	0,135	0,00031	0,144	0,00041	0,159	0,00061
0,002	0,180	0,00035	0,189	0,00043	0,203	0,00057	0,224	0,00086
0,003	0,220	0,00043	0,232	0,00053	0,248	0,00070	0,274	0,00105
0,004	0,252	0,00049	0,265	0,00061	0,284	0,00080	0,314	0,00121
0,005	0,284	0,00056	0,299	0,00068	0,321	0,00091	0,354	0,00136
0,006	0,308	0,00060	0,324	0,00074	0,347	0,00098	0,383	0,00147
0,007	0,336	0,00066	0,354	0,00081	0,379	0,00107	0,418	0,00161
0,008	0,356	0,00070	0,375	0,00086	0,401	0,00113	0,443	0,00171
0,009	0,380	0,00074	0,400	0,00092	0,428	0,00121	0,473	0,00182
0,01	0,400	0,00078	0,421	0,00096	0,451	0,00128	0,498	0,00191
0,015	0,488	0,00096	0,514	0,00118	0,550	0,00156	0,598	0,00229
0,02	0,564	0,00111	0,594	0,00136	0,636	0,00180	0,702	0,00270
0,025	0,632	0,00124	0,665	0,00152	0,713	0,00202	0,787	0,00303
0,03	0,692	0,00136	0,728	0,00177	0,780	0,00221	0,862	0,00332
0,035	0,748	0,00147	0,787	0,00180	0,843	0,00239	0,921	0,00345
0,04	0,800	0,00157	0,842	0,00193	0,902	0,00255	0,996	0,00372
0,045	0,848	0,00166	0,893	0,00204	0,956	0,00271	1,056	0,00407
0,05	0,892	0,00175	0,939	0,00215	1,006	0,00285	1,111	0,00428
0,06	0,980	0,00192	1,031	0,00236	1,105	0,00313	1,220	0,00470
0,07	1,060	0,00208	1,116	0,00266	1,195	0,00338	1,321	0,00509
0,08	1,122	0,00220	1,191	0,00273	1,276	0,00361	1,409	0,00542
0,09	1,200	0,00235	1,263	0,00289	1,353	0,00382	1,494	0,00574
0,10	1,264	0,00248	1,330	0,00305	1,425	0,00403	1,574	0,00606
0,12	1,384	0,00271	1,457	0,00334	1,560	0,00442	1,723	0,00663
0,15	1,548	0,00303	1,629	0,00373	1,745	0,00494	1,927	0,00732
0,20	1,788	0,00350	1,882	0,00431	2,016	0,00571	2,226	0,00857

DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

DIAMÈTRE 0m,081 SURFACE 0mq,00515		DIAMÈTRE 0m,09 SURFACE 0mq,00636		DIAMÈTRE 0m,10 SURFACE 0mq,00785		DIAMÈTRE 0m,108 SURFACE 0mq,00916		DIAMÈTRE 0m,12 SURFACE 0mq,0113	
VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT	VITESSE	DÉBIT
0,055	0,00028	0,058	0,00037	0,062	0,00049	0,065	0,00059	0,068	0,00077
0,066	0,00034	0,082	0,00052	0,087	0,00068	0,090	0,00082	0,095	0,0011
0,093	0,00048	0,099	0,00063	0,105	0,00082	0,110	0,00101	0,116	0,0013
0,109	0,00056	0,116	0,00074	0,124	0,00097	0,129	0,00118	0,136	0,0015
0,120	0,00062	0,128	0,00081	0,136	0,00107	0,142	0,00130	0,150	0,0017
0,131	0,00067	0,140	0,00089	0,149	0,00117	0,155	0,00142	0,163	0,0018
0,142	0,00073	0,151	0,00096	0,161	0,00126	0,168	0,00154	0,175	0,0020
0,153	0,00079	0,163	0,00104	0,174	0,00137	0,181	0,00166	0,191	0,0022
0,164	0,00084	0,175	0,00111	0,186	0,00146	0,194	0,00178	0,204	0,0023
0,175	0,00090	0,186	0,00118	0,198	0,00155	0,207	0,00190	0,218	0,0025
0,246	0,00127	0,262	0,00167	0,279	0,00219	0,291	0,00267	0,306	0,0035
0,300	0,00154	0,320	0,00204	0,341	0,00268	0,355	0,00325	0,375	0,0042
0,345	0,00178	0,367	0,00233	0,391	0,00307	0,407	0,00373	0,429	0,0048
0,388	0,00200	0,413	0,00263	0,440	0,00345	0,459	0,00420	0,484	0,0055
0,420	0,00216	0,448	0,00285	0,477	0,00374	0,497	0,00455	0,524	0,0059
0,459	0,00236	0,489	0,00311	0,521	0,00409	0,543	0,00497	0,572	0,0065
0,486	0,00250	0,518	0,00329	0,552	0,00433	0,575	0,00527	0,606	0,0068
0,519	0,00267	0,553	0,00352	0,589	0,00462	0,614	0,00562	0,647	0,0073
0,546	0,00281	0,582	0,00370	0,620	0,00487	0,646	0,00592	0,681	0,0077
0,666	0,00343	0,710	0,00452	0,756	0,00593	0,788	0,00722	0,831	0,0094
0,770	0,00397	0,821	0,00522	0,874	0,00686	0,911	0,00834	0,960	0,0108
0,863	0,00444	0,920	0,00585	0,980	0,00769	1,021	0,00935	1,076	0,0122
0,945	0,00487	1,007	0,00640	1,073	0,00812	1,118	0,01024	1,178	0,0133
1,021	0,00526	1,088	0,00692	1,159	0,00910	1,208	0,01107	1,267	0,0143
1,092	0,00562	1,164	0,00740	1,240	0,00973	1,292	0,01183	1,362	0,0154
1,158	0,00596	1,244	0,00791	1,314	0,01031	1,370	0,01255	1,444	0,0163
1,218	0,00627	1,298	0,00826	1,383	0,01086	1,441	0,01320	1,519	0,0172
1,338	0,00689	1,426	0,00907	1,519	0,01192	1,583	0,01542	1,668	0,0188
1,447	0,00745	1,542	0,00981	1,603	0,01258	1,712	0,01568	1,805	0,0204
1,515	0,00780	1,647	0,01047	1,755	0,01378	1,828	0,01674	1,927	0,0218
1,638	0,00844	1,746	0,01110	1,860	0,01460	1,938	0,01775	2,043	0,0231
1,725	0,00888	1,839	0,01170	1,959	0,01538	2,041	0,01869	2,152	0,0243
1,889	0,00973	2,014	0,01281	2,145	0,01684	2,235	0,02047	2,356	0,0266
2,113	0,01188	2,252	0,01532	2,399	0,01883	2,500	0,02290	2,629	0,0297
2,441	0,01257	2,602	0,01655	2,771	0,02175	2,888	0,02645	3,044	0,0344

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET									
	Diamètre 0m,135 Section 0mq,0143		Diamètre 0m,15 Section 0mq,0177		Diamètre 0m,162 Section 0mq,0206		Diamètre 0m,18 Section 0mq.0264		Diamètre 0m,19 Section 0mq,0284	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,074	0,00106	0,079	0,00140	0,082	0,00169	0,087	0,00230	0,089	0,00255
0,0002	0,104	0,00153	0,110	0,00195	0,115	0,00237	0,121	0,00319	0,124	0,00352
0,0003	0,126	0,00180	0,134	0,00237	0,140	0,00288	0,148	0,00391	0,151	0,00429
0,0004	0,148	0,00212	0,157	0,00278	0,164	0,00338	0,174	0,00459	0,178	0,00506
0,0005	0,163	0,00233	0,173	0,00306	0,180	0,00351	0,192	0,00507	0,196	0,00557
0,0006	0,178	0,00254	0,189	0,00334	0,197	0,00406	0,210	0,00554	0,213	0,00605
0,0007	0,193	0,00276	0,204	0,00361	0,214	0,00441	0,227	0,00599	0,231	0,00656
0,0008	0,207	0,00296	0,220	0,00389	0,230	0,00474	0,244	0,00644	0,249	0,00707
0,0009	0,222	0,00317	0,236	0,00418	0,247	0,00509	0,262	0,00692	0,267	0,00758
0,001	0,237	0,00339	0,252	0,00446	0,263	0,00542	0,279	0,00737	0,284	0,00807
0,002	0,333	0,00476	0,354	0,00627	0,370	0,00762	0,393	0,0104	0,400	0,0114
0,003	0,408	0,00583	0,433	0,00766	0,452	0,00931	0,480	0,0127	0,489	0,0139
0,004	0,467	0,00668	0,491	0,00874	0,518	0,0107	0,550	0,0145	0,560	0,0159
0,005	0,526	0,00752	0,559	0,00984	0,584	0,0120	0,620	0,0164	0,631	0,0179
0,006	0,571	0,00816	0,606	0,0107	0,634	0,0131	0,672	0,0177	0,685	0,0195
0,007	0,622	0,00889	0,661	0,0117	0,690	0,0142	0,733	0,0194	0,747	0,0215
0,008	0,659	0,00942	0,700	0,0124	0,732	0,0151	0,777	0,0205	0,791	0,0225
0,009	0,704	0,0101	0,748	0,0132	0,781	0,0161	0,829	0,0219	0,845	0,0240
0,01	0,741	0,0106	0,787	0,0139	0,822	0,0169	0,873	0,0230	0,889	0,0252
0,015	0,904	0,0129	0,960	0,0170	1,00	0,0206	1,07	0,0282	1,08	0,0307
0,02	1,045	0,0149	1,11	0,0196	1,16	0,0239	1,23	0,0325	1,25	0,0355
0,025	1,17	0,0167	1,24	0,0219	1,30	0,0268	1,38	0,0364	1,40	0,0398
0,03	1,28	0,0183	1,40	0,0248	1,42	0,0293	1,51	0,0399	1,54	0,0437
0,035	1,38	0,0197	1,48	0,0262	1,54	0,0317	1,63	0,0430	1,66	0,0471
0,04	1,48	0,0212	1,57	0,0275	1,64	0,0338	1,75	0,0462	1,78	0,0506
0,045	1,57	0,0224	1,67	0,0296	1,74	0,0358	1,85	0,0488	1,88	0,0534
0,05	1,65	0,0236	1,76	0,0311	1,83	0,0377	1,95	0,0515	1,98	0,0562
0,06	1,82	0,0260	1,93	0,0342	2,01	0,0414	2,14	0,0565	2,18	0,0619
0,07	1,96	0,0280	2,08	0,0368	2,18	0,0449	2,31	0,0610	2,36	0,0670
0,08	2,10	0,0300	2,23	0,0395	2,33	0,0480	2,47	0,0652	2,52	0,0716
0,09	2,22	0,0317	2,36	0,0418	2,47	0,0509	2,62	0,0692	2,67	0,0758
0,10	2,34	0,0335	2,49	0,0441	2,60	0,0536	2,76	0,0729	2,81	0,0798
0,12	2,56	0,0366	2,72	0,0481	2,84	0,0585	3,02	0,0797	3,08	0,0875
0,15	2,87	0,0410	3,05	0,0540	3,18	0,0655	3,38	0,0892	3,44	0,0977
0,20	3,31	0,0473	3,52	0,0623	3,67	0,0756	3,90	0,1030	3,97	0,1127

DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

Diamètre 0m,20 Section 0mq,0314		Diamètre 0m,216 Section 0mq,0366		Diamètre 0m,23 Section 0mq,0415		Diamètre 0m,25 Section 0mq,0491		Diamètre 0m,27 Section 0mq,0573		Diamètre 0m,29 Section 0mq,066	
Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,093	0,00292	0,097	0,00355	0,100	0,00415	0,105	0,00516	0,109	0,00625	0,114	0,00752
0,130	0,00408	0,135	0,00494	0,140	0,00581	0,147	0,00722	0,153	0,00877	0,159	0,0105
0,157	0,00493	0,164	0,00600	0,170	0,00705	0,178	0,00874	0,186	0,0107	0,193	0,0127
0,185	0,00581	0,193	0,00706	0,200	0,00830	0,210	0,0103	0,218	0,0125	0,227	0,0150
0,204	0,00641	0,213	0,00780	0,220	0,00913	0,231	0,0113	0,240	0,0138	0,250	0,0165
0,221	0,00694	0,230	0,00842	0,240	0,00996	0,252	0,0124	0,262	0,0150	0,272	0,0180
0,241	0,00757	0,251	0,00919	0,260	0,0108	0,272	0,0134	0,284	0,0163	0,295	0,0195
0,259	0,00813	0,270	0,00988	0,280	0,0115	0,293	0,0144	0,306	0,0175	0,318	0,0210
0,278	0,00873	0,290	0,0106	0,300	0,0124	0,314	0,0154	0,328	0,0188	0,340	0,0224
0,296	0,00929	0,309	0,0113	0,320	0,0133	0,335	0,0164	0,349	0,0200	0,363	0,0240
0,407	0,0128	0,435	0,0159	0,450	0,0187	0,472	0,0232	0,491	0,0281	0,511	0,0337
0,509	0,0160	0,531	0,0194	0,550	0,0228	0,576	0,0283	0,601	0,0344	0,624	0,0412
0,583	0,0183	0,609	0,0223	0,630	0,0261	0,660	0,0324	0,688	0,0394	0,715	0,0472
0,657	0,0206	0,686	0,0251	0,710	0,0295	0,744	0,0365	0,775	0,0449	0,806	0,0532
0,713	0,0224	0,744	0,0272	0,770	0,0320	0,807	0,0396	0,841	0,0482	0,874	0,0577
0,777	0,0244	0,811	0,0297	0,840	0,0349	0,880	0,0432	0,917	0,0525	0,953	0,0629
0,824	0,0259	0,860	0,0315	0,890	0,0369	0,933	0,0458	0,972	0,0557	1,01	0,0667
0,880	0,0276	0,918	0,0336	0,950	0,0394	0,996	0,0489	1,04	0,0596	1,08	0,0713
0,926	0,0291	0,966	0,0354	1,00	0,0415	1,05	0,0516	1,09	0,0625	1,14	0,0752
1,13	0,0355	1,18	0,0432	1,22	0,0506	1,28	0,0628	1,33	0,0762	1,38	0,0911
1,30	0,0408	1,36	0,0498	1,41	0,0585	1,48	0,0727	1,54	0,0882	1,60	0,1056
1,46	0,0458	1,53	0,0560	1,58	0,0656	1,66	0,0815	1,73	0,0991	1,79	0,1181
1,60	0,0502	1,67	0,0611	1,73	0,0718	1,81	0,0889	1,89	0,1084	1,96	0,1294
1,73	0,0543	1,81	0,0662	1,87	0,0776	1,96	0,0962	2,04	0,1169	2,12	0,1399
1,85	0,0581	1,93	0,0706	2,00	0,0830	2,10	0,1031	2,18	0,1249	2,27	0,1498
1,96	0,0615	2,05	0,0750	2,12	0,0880	2,22	0,1090	2,32	0,1329	2,41	0,1591
2,06	0,0647	2,15	0,0787	2,23	0,0925	2,34	0,1149	2,43	0,1392	2,53	0,1670
2,26	0,0710	2,37	0,0867	2,45	0,1017	2,55	0,1252	2,68	0,1536	2,78	0,1835
2,45	0,0769	2,56	0,0937	2,65	0,1100	2,78	0,1365	2,89	0,1656	3,01	0,1987
2,62	0,0823	2,73	0,0999	2,83	0,1174	2,97	0,1458	3,09	0,1771	3,21	0,2119
2,78	0,0873	2,90	0,1061	3,00	0,1245	3,14	0,1542	3,28	0,1879	3,41	0,2251
2,93	0,0920	3,05	0,1116	3,16	0,1311	3,31	0,1625	3,45	0,1977	3,59	0,2369
3,19	0,1002	3,34	0,1222	3,46	0,1436	3,63	0,1782	3,78	0,2166	3,93	0,2594
3,58	0,1124	3,74	0,1369	3,87	0,1606	4,06	0,1993	4,23	0,2424	4,39	0,2997
4,03	0,1265	4,32	0,1581	4,47	0,1855	4,68	0,2298	4,88	0,2796	5,07	0,3346

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET							
	DIAMÈTRE $0^m,30$ SECTION $0^{mq},0707$		DIAMÈTRE $0^m,325$ SECTION $0^{mq},083$		DIAMÈTRE $0^m,34$ SECTION $0^{mq},0908$		DIAMÈTRE $0^m,36$ SECTION $0^{mq},1018$	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,116	0,0082	0,121	0,010	0,124	0,011	0,127	0,013
0,0002	0,162	0,0115	0,169	0,014	0,173	0,016	0,178	0,019
0,0003	0,197	0,0139	0,205	0,017	0,210	0,019	0,217	0,022
0,0004	0,231	0,0163	0,241	0,020	0,247	0,022	0,255	0,026
0,0005	0,254	0,0185	0,266	0,022	0,272	0,025	0,280	0,029
0,0006	0,277	0,0196	0,290	0,024	0,297	0,027	0,306	0,031
0,0007	0,301	0,0212	0,314	0,026	0,321	0,029	0,331	0,034
0,0008	0,324	0,0229	0,338	0,028	0,346	0,031	0,357	0,036
0,0009	0,347	0,0245	0,362	0,030	0,371	0,034	0,382	0,039
0,001	0,370	0,0262	0,386	0,032	0,396	0,036	0,408	0,042
0,002	0,520	0,0364	0,543	0,045	0,556	0,050	0,573	0,059
0,003	0,636	0,0460	0,664	0,055	0,680	0,062	0,701	0,071
0,004	0,728	0,0505	0,760	0,063	0,779	0,071	0,803	0,082
0,005	0,821	0,0581	0,857	0,071	0,878	0,079	0,905	0,092
0,006	0,890	0,0629	0,929	0,077	0,952	0,086	0,981	0,100
0,007	0,971	0,0686	1,01	0,084	1,04	0,094	1,07	0,109
0,008	1,03	0,0728	1,07	0,089	1,10	0,100	1,13	0,115
0,009	1,10	0,0778	1,15	0,095	1,17	0,106	1,21	0,123
0,01	1,16	0,0821	1,21	0,100	1,24	0,113	1,27	0,130
0,015	1,41	0,0997	1,47	0,122	1,51	0,137	1,55	0,158
0,02	1,63	0,115	1,70	0,141	1,74	0,150	1,80	0,183
0,025	1,83	0,129	1,91	0,159	1,95	0,177	2,01	0,205
0,03	2,00	0,141	2,09	0,173	2,14	0,194	2,20	0,224
0,035	2,16	0,153	2,26	0,187	2,31	0,219	2,38	0,242
0,04	2,31	0,163	2,41	0,200	2,47	0,224	2,55	0,260
0,045	2,45	0,174	2,56	0,212	2,62	0,238	2,70	0,275
0,05	2,58	0,182	2,69	0,223	2,76	0,251	2,81	0,286
0,06	2,83	0,200	2,96	0,246	3,03	0,275	3,11	0,317
0,07	3,06	0,217	3,20	0,266	3,27	0,297	3,38	0,344
0,08	3,27	0,231	3,42	0,283	3,50	0,318	3,61	0,367
0,09	3,47	0,245	3,62	0,300	3,71	0,337	3,82	0,389
0,10	3,65	0,258	3,81	0,316	3,91	0,355	4,03	0,410
0,12	4,00	0,283	4,18	0,342	4,28	0,389	4,41	0,449
0,15	4,47	0,316	4,67	0,388	4,78	0,405	4,93	0,502
0,20	5,17	0,366	5,40	0,448	5,52	0,501	5,69	0,580

DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

DIAMÈTRE 0m,38 SECTION 0mq,1134		DIAMÈTRE 0m,40 SECTION 0mq,1257		DIAMÈTRE 0m,42 SECTION 0mq,1385		DIAMÈTRE 0m,44 SECTION 0mq,152		DIAMÈTRE 0m,46 SECTION 0mq,166		DIAMÈTRE 0m,48 SECTION 0mq,181	
Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,131	0,015	0,135	0,017	0,138	0,019	0,142	0,022	0,145	0,024	0,148	0,027
0,184	0,021	0,189	0,024	0,194	0,027	0,199	0,030	0,203	0,034	0,208	0,038
0,225	0,025	0,229	0,029	0,235	0,033	0,241	0,037	0,247	0,041	0,252	0,046
0,262	0,030	0,270	0,034	0,277	0,038	0,284	0,043	0,290	0,048	0,297	0,054
0,289	0,033	0,297	0,037	0,304	0,042	0,312	0,047	0,319	0,053	0,326	0,061
0,315	0,036	0,324	0,041	0,332	0,046	0,340	0,052	0,348	0,058	0,356	0,064
0,341	0,039	0,350	0,044	0,360	0,050	0,369	0,056	0,375	0,062	0,386	0,070
0,367	0,042	0,377	0,047	0,387	0,054	0,397	0,060	0,406	0,067	0,416	0,075
0,394	0,044	0,404	0,051	0,415	0,057	0,425	0,064	0,435	0,072	0,444	0,080
0,420	0,048	0,431	0,054	0,443	0,061	0,454	0,068	0,464	0,077	0,474	0,086
0,590	0,067	0,607	0,076	0,622	0,086	0,638	0,097	0,653	0,108	0,668	0,119
0,722	0,082	0,741	0,094	0,761	0,105	0,78	0,119	0,802	0,133	0,816	0,148
0,827	0,094	0,849	0,107	0,871	0,123	0,893	0,136	0,914	0,152	0,935	0,169
0,932	0,106	0,957	0,120	0,982	0,136	1,01	0,154	1,03	0,171	1,05	0,190
1,01	0,115	1,04	0,131	1,06	0,147	1,09	0,166	1,13	0,187	1,15	0,208
1,10	0,125	1,13	0,142	1,16	0,161	1,19	0,181	1,22	0,203	1,25	0,226
1,17	0,133	1,20	0,151	1,23	0,170	1,26	0,192	1,29	0,214	1,32	0,239
1,25	0,142	1,28	0,161	1,31	0,181	1,35	0,204	1,38	0,229	1,41	0,255
1,31	0,149	1,35	0,170	1,38	0,191	1,42	0,216	1,45	0,241	1,48	0,268
1,60	0,181	1,64	0,206	1,69	0,234	1,73	0,263	1,77	0,294	1,81	0,328
1,85	0,210	1,90	0,239	1,95	0,270	2,00	0,304	2,05	0,340	2,09	0,378
2,07	0,235	2,13	0,268	2,19	0,304	2,24	0,340	2,29	0,380	2,34	0,424
2,27	0,250	2,33	0,293	2,39	0,331	2,45	0,371	2,51	0,417	2,57	0,465
2,45	0,278	2,52	0,317	2,59	0,359	2,65	0,402	2,71	0,450	2,78	0,503
2,62	0,297	2,70	0,340	2,77	0,384	2,83	0,430	2,90	0,481	2,97	0,538
2,78	0,315	2,86	0,360	2,93	0,406	3,00	0,456	3,08	0,511	3,15	0,570
2,93	0,332	3,01	0,378	3,08	0,427	3,16	0,470	3,24	0,538	3,31	0,599
3,21	0,364	3,30	0,415	3,39	0,470	3,47	0,527	3,55	0,589	3,63	0,657
3,48	0,395	3,57	0,439	3,66	0,507	3,76	0,572	3,85	0,639	3,92	0,719
3,71	0,421	3,81	0,479	3,91	0,542	4,01	0,610	4,11	0,682	4,20	0,760
3,94	0,447	4,04	0,508	4,15	0,575	4,25	0,645	4,35	0,722	4,44	0,804
4,15	0,470	4,26	0,535	4,37	0,605	4,48	0,681	4,59	0,762	4,68	0,847
4,54	0,514	4,66	0,586	4,79	0,663	4,90	0,745	5,02	0,833	5,12	0,927
5,08	0,576	5,22	0,656	5,35	0,741	5,49	0,834	5,62	0,933	5,73	1,04
5,86	0,665	6,03	0,758	6,18	0,856	6,34	0,964	6,49	1,08	6,63	1,26

CHARGES PAR MÈTRE COURANT DE TUYAU	VITESSES D'ÉCOULEMENT EN MÈTRES ET											
	Diamètre $0^m,50$ Section $0^{mq},196$		Diamètre $0^m,55$ Section $0^{mq},238$		Diamètre $0^m,60$ Section $0^{mq},283$		Diamètre $0^m,65$ Section $0^{mq},332$		Diamètre $0^m,70$ Section $0^{mq},385$		Diamètre $0^m,75$ Section $0^{mq},442$	
	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,0001	0,152	0,030	0,159	0,038	0,167	0,047	0,174	0,058	0,182	0,070	0,187	0,0[illegible]
0,0002	0,212	0,042	0,223	0,053	0,234	0,066	0,243	0,081	0,254	0,098	0,262	0,1[illegible]
0,0003	0,258	0,053	0,271	0,064	0,284	0,080	0,295	0,098	0,309	0,119	0,318	0,14[illegible]
0,0004	0,303	0,059	0,319	0,076	0,334	0,095	0,348	0,116	0,363	0,140	0,374	0,16[illegible]
0,0005	0,334	0,065	0,351	0,084	0,367	0,104	0,382	0,127	0,400	0,154	0,412	0,18[illegible]
0,0006	0,364	0,071	0,383	0,091	0,400	0,113	0,417	0,136	0,436	0,168	0,449	0,19[illegible]
0,0007	0,394	0,077	0,414	0,101	0,434	0,123	0,452	0,150	0,472	0,182	0,487	0,21[illegible]
0,0008	0,424	0,083	0,446	0,106	0,467	0,132	0,487	0,163	0,508	0,196	0,524	0,2[illegible]
0,0009	0,455	0,089	0,478	0,114	0,500	0,141	0,521	0,176	0,545	0,210	0,562	0,2[illegible]
0,001	0,485	0,095	0,510	0,121	0,534	0,151	0,556	0,185	0,581	0,224	0,599	0,2[illegible]
0,002	0,682	0,133	0,717	0,171	0,751	0,213	0,782	0,261	0,817	0,315	0,842	0,3[illegible]
0,003	0,834	0,163	0,877	0,209	0,917	0,260	0,956	0,317	0,999	0,385	1,03	0,4[illegible]
0,004	0,9[illegible]5	0,187	1,00	0,238	1,05	0,297	1,09	0,362	1,14	0,439	1,18	0,5[illegible]
0,005	1,08	0,212	1,13	0,269	1,18	0,334	1,23	0,408	1,29	0,497	1,33	0,5[illegible]
0,006	1,17	0,229	1,23	0,303	1,28	0,362	1,35	0,448	1,40	0,539	1,44	0,6[illegible]
0,007	1,27	0,252	1,34	0,319	1,40	0,396	1,46	0,485	1,53	0,589	1,57	0,6[illegible]
0,008	1,35	0,265	1,42	0,338	1,48	0,419	1,55	0,515	1,62	0,624	1,67	0,7[illegible]
0,009	1,44	0,282	1,51	0,359	1,58	0,447	1,65	0,548	1.73	0,666	1,79	0,7[illegible]
0,01	1,52	0,298	1,59	0,378	1,67	0,462	1,74	0,581	1,82	0,701	1,87	0,8[illegible]
0,015	1,85	0,363	1,93	0,459	2,03	0,575	2,12	0,704	2,22	0,856	2,28	1,01
0,02	2,14	0,419	2,25	0,536	2,35	0,665	2,45	0,813	2,56	0,909	2,64	1,17
0,025	2,40	0,460	2,52	0,600	2,64	0,747	2,75	0,915	2,87	1,10	2,96	1,31
0,03	2,62	0,514	2,75	0,655	2,89	0,818	3,01	0,999	3,14	1,21	3,24	1,43
0,035	2,83	0,555	2,98	0,709	3,12	0,883	3,25	1,08	3,40	1,31	3,50	1,5[illegible]
0,04	3,03	0,593	3,19	0,759	3,34	0,945	3,48	1,16	3,63	1,40	3,74	1,6[illegible]
0,045	3,21	0,629	3,40	0,809	3,54	1,02	3,68	1,22	3,85	1,47	3,97	1,7[illegible]
0,05	3,38	0,662	3,57	0,850	3,72	1,05	3,88	1,29	4,05	1,56	4,17	1,84
0,06	3,71	0,727	3,91	0,931	4,09	1,16	4,26	1,41	4,45	1,72	4,59	2,0[illegible]
0,07	4,02	0,788	4,22	1,00	4,42	1,25	4,61	1,59	4,81	1,85	4,96	2,19
0,08	4,29	0,841	4,51	1,07	4,72	1,34	4,93	1,64	5,14	1,98	5,30	2,34
0,09	4,55	0,812	4,78	1,14	5,00	1,42	5,21	1,73	5,45	2,10	5,62	2,48
0,10	4,79	0,939	5,04	1,20	5,27	1,49	5,49	1,82	5,74	2,21	5,92	2,62
0,12	5,25	1,03	5,52	1,31	5,77	1,63	6,01	2,00	6,28	2,42	6,48	2,8[illegible]
0,15	5,87	1,15	6,17	1,47	6,46	1,83	6,73	2,23	7,03	2,71	7,24	3,21
0,20	6,78	1,33	7,13	1,70	7,46	2,11	7,77	2,58	8,12	3,53	8,37	3,70

DÉBITS EN MÈTRES CUBES PAR SECONDE POUR DES TUYAUX DE

Diamètre 0m,80 Section 0mq,503		Diamètre 0m,85 Section 0mq,567		Diamètre 0m,90 Section 0mq,636		Diamètre 0m,95 Section 0mq,709		Diamètre 1m,00 Section 0mq,785		Diamètre 1m,20 Section 1mq,13		Diamètre 1m,50 Section 1mq,77	
Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit	Vitesse	Débit
0,194	0,098	0,200	0,113	0,206	0,131	0,211	0,150	0,217	0,170	0,245	0,277	0,274	0,485
0,271	0,136	0,280	0,159	0,288	0,183	0,296	0,210	0,304	0,239	0,343	0,387	0,383	0,678
0,329	0,165	0,339	0,193	0,350	0,223	0,359	0,255	0,369	0,290	0,417	0,471	0,465	0,823
0,387	0,195	0,399	0,226	0,411	0,261	0,423	0,300	0,434	0,341	0,490	0,554	0,548	0,970
0,426	0,214	0,439	0,249	0,452	0,286	0,465	0,330	0,478	0,375	0,539	0,620	0,603	1,07
0,465	0,234	0,479	0,272	0,493	0,314	0,507	0,359	0,521	0,409	0,588	0,654	0,657	1,16
0,503	0,253	0,518	0,293	0,535	0,340	0,550	0,390	0,564	0,443	0,637	0,719	0,712	1,26
0,542	0,273	0,559	0,347	0,576	0,366	0,592	0,420	0,608	0,477	0,686	0,775	0,767	1,36
0,581	0,292	0,599	0,340	0,617	0,392	0,634	0,450	0,651	0,511	0,735	0,831	0,822	1,46
0,620	0,312	0,639	0,362	0,658	0,418	0,676	0,479	0,695	0,546	0,784	0,886	0,876	1,56
0,871	0,438	0,899	0,509	0,922	0,586	0,951	0,674	0,997	0,783	1,10	1,14	1,23	2,18
1,06	0,533	1,10	0,624	1,13	0,719	1,16	0,822	1,19	0,954	1,35	1,53	1,51	2,67
1,22	0,614	1,26	0,704	1,30	0,827	1,33	0,941	1,37	1,08	1,54	1,74	1,73	3,06
1,37	0,689	1,42	0,806	1,46	0,928	1,50	1,06	1,54	1,21	1,74	1,97	1,94	3,43
1,49	0,749	1,54	0,873	1,58	1,00	1,63	1,16	1,67	1,31	1,89	2,14	2,11	3,73
1,63	0,820	1,68	0,953	1,73	1,10	1,78	1,26	1,82	1,43	2,06	2,33	2,30	4,07
1,72	0,865	1,78	1,01	1,83	1,16	1,88	1,33	1,93	1,52	2,18	2,46	2,44	4,32
1,84	0,926	1,90	1,08	1,95	1,24	2,01	1,43	2,06	1,62	2,33	2,63	2,60	4,60
1,94	0,982	2,00	1,13	2,01	1,28	2,11	1,50	2,17	1,70	2,45	2,77	2,74	4,85
2,36	1,19	2,44	1,38	2,51	1,60	2,58	1,83	2,65	2,08	2,99	3,38	3,34	5,91
2,73	1,37	2,82	1,60	2,90	1,83	2,98	2,11	3,06	2,40	3,45	3,80	3,86	6,83
3,06	1,54	3,16	1,78	3,25	2,07	3,34	2,37	3,43	2,69	3,87	4,37	4,33	7,66
3,35	1,69	3,45	1,96	3,56	2,26	3,66	2,59	3,76	2,95	4,24	4,79	4,74	8,39
3,62	1,82	3,73	2,12	3,84	2,44	3,96	2,81	4,06	3,19	4,58	5,18	5,02	8,89
3,87	1,95	3,99	2,26	4,11	2,61	4,23	3,00	4,34	3,41	4,90	5,54	5,48	9,70
4,10	2,06	4,23	2,40	4,36	2,77	4,48	3,18	4,60	3,61	5,19	5,86	5,81	10,28
4,32	2,17	4,45	2,52	4,58	2,91	4,71	3,34	4,84	3,80	5,46	6,17	6,11	10,81
4,71	2,48	4,89	2,77	5,04	3,21	5,18	3,67	5,32	4,18	6,00	6,78	6,63	11,74
5,15	2,57	5,29	3,00	5,45	3,47	5,60	3,97	5,75	4,50	6,49	7,33	7,23	12,80
5,48	2,76	5,65	3,20	5,82	3,70	5,99	4,25	6,14	4,81	6,93	7,83	7,75	13,72
5,81	2,92	5,99	3,40	6,17	3,92	6,34	4,50	6,51	5,11	7,35	8,31	8,22	14,55
6,12	3,08	6,31	3,58	6,50	4,13	6,68	4,73	6,86	5,39	7,74	8,75	8,66	15,33
6,70	3,37	6,91	3,92	7,11	4,52	7,31	5,18	7,51	5,90	8,48	9,58	9,48	16,78
7,48	3,76	7,73	4,38	7,96	5,06	8,19	5,61	8,40	6,60	9,48	10,71	10,60	18,76
8,65	4,35	8,95	5,06	9,19	5,84	9,45	6,70	9,70	7,61	10,95	12,37	12,24	21,66

La table III a été établie au moyen de la formule

$$(1) \qquad rj = b_1 u^2$$

dans laquelle on a donné au coefficient b_1 des valeurs doubles de celles qui conviennent aux tuyaux neufs.

Cette table est à double entrée : la charge et le diamètre. Nous avons pris des charges variant de 0m,0001 à 0m,20 par mètre ; comme c'est dans le cas des petites charges que la précision est surtout désirable, nous avons considéré : 1° celles qui varient de dixième en dixième de millimètre de 0m,0001 à 0m,001 ; 2° celles qui varient de millimètre en millimètre de 0m,001 à 0m,01 ; 3° celles qui varient de 5 en 5 millimètres de 0m,01 à 0m,05 ; 4° celles qui varient de centimètre en centimètre de 0m,05 à 0m,10 ; 5° et enfin les charges de 0m,12, 0m,15, 0m,20, qui ne peuvent se rencontrer dans la pratique que d'une manière exceptionnelle.

Les données ordinaires du problème de la distribution sont la charge disponible et le débit qu'on veut obtenir, et ces deux quantités sont liées par la relation

$$(2) \qquad j = \frac{b_1 q^2}{\pi^2 r^5};$$

mais le coefficient b_1 dépendant de r, l'emploi de cette formule exige une série de tâtonnements; elle conduisait donc à de trop longs calculs.

C'est ce qui nous a conduit à adopter pour entrées la charge et le rayon ; les trois quantités r, j, b, sont alors connues dans la formule (1), on en déduit la vitesse u qui, multipliée par la section, donne le débit.

M. Mary, dans son Cours autographié de l'École des Ponts et Chaussées, a donné une table analogue à celle que nous présentons : elle a pour entrées le débit et le diamètre. Elle a été calculée au moyen des formules et tables de de Prony.

Les résultats numériques qu'elle donne ne sont donc pas conformes à la théorie de Darcy.

En effet, ces résultats diffèrent de ceux que fournit notre table III; la concordance s'établit à peu près pour les petits et les grands diamètres, mais avec notre table les résultats sont toujours inférieurs à ceux qu'on obtient avec la table de M. Mary. La différence est pour les diamètres moyens de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{6}$.

Pour une charge de 0,0002 et un diamètre de 0m,30, la table de M. Mary donne une vitesse de 0m,18 et un débit de 0m,013.

Pour la même charge de 0m,0002 et le même diamètre 0m,30, notre table donne une vitesse de 0m,16 et un débit de 0m,012.

Pour une charge de 0m,001 et un diamètre de 0m,30, la table de M. Mary donne une vitesse de 0m,44 et un débit de 0m,031, tandis que notre table donne une vitesse de 0m,37 et un débit de 0m,026.

Cette comparaison montre que l'on risque moins de se tromper en se servant de notre table pour calculer une distribution d'eau qu'en ayant recours à la table de M. Mary.

Sans doute, les pertes de charge seront beaucoup moindres que le calcul ne le suppose pendant les premiers temps que les tuyaux seront en service, mais

c'est surtout en vue de l'avenir que la distribution d'eau doit être établie, et, avec les résultats des tables, on n'aura point de mécomptes à redouter.

Nous aurions pu traduire les tables précédentes en tableaux graphiques anamorphosés, mais tous ceux qui se sont servis de tableaux graphiques savent combien l'usage en est peu commode ; pour les rendre facilement maniables, il faudrait les construire à grande échelle avec des lignes de couleurs variées ; à petite échelle, avec des lignes noires, les tableaux graphiques sont très-confus et peuvent donner lieu à des erreurs.

USAGES DE LA TABLE III

La table III permet de résoudre immédiatement les six problèmes que nous avons étudiés au chapitre premier et qui résultent de la combinaison des quatre quantités :

Le rayon r de la conduite, la charge j par mètre courant, la vitesse moyenne u et le débit q.

Ces quatre quantités sont liées par deux équations, de sorte que deux d'entre elles étant données, on peut calculer les deux autres.

Cela donne lieu à six problèmes ; deux seulement sont intéressants au point de vue pratique.

Premier problème. — *Connaissant le rayon d'une conduite et la charge par mètre courant, déterminer la vitesse moyenne et le débit.*

Soit une conduite de $0^m,20$ de diamètre, ou de $0^m,10$ de rayon, soumise à une charge de $0^m,001$ par mètre; cherchons sur la ligne horizontale supérieure de la table le diamètre $0^m,20$ et descendons les deux colonnes verticales correspondantes jusqu'à la ligne horizontale correspondant à la charge $0^m,001$, nous trouvons pour la valeur de la vitesse $0^m,296$ et pour la valeur du débit $0^{mc},00929$ soit 9 litres 29 centilitres, à la seconde.

Si les données ne se trouvent pas exactement dans les tables, on procède par interpolation, dans la forme ordinaire. Exemple : prenons avec le même diamètre la charge $0^m,0012$, la vitesse sera comprise entre $0^m,296$ et $0^m,407$, et le débit entre $0^m,00929$ et $0^m,0128$. Les différences sont $0^m,111$ et $0^m,00351$, dont les deux dixièmes sont égaux à $0^m,0222$ et $0^m,0007$; la vitesse sera donc de :

$$0{,}296+0{,}0222=0{,}0318$$

et le débit

$$0{,}00929+0{,}0007=0{,}00999$$

Deuxième problème. — *Connaissant la charge disponible et le débit à obtenir, on demande le rayon et la vitesse.*

Soit une charge de $0^m,001$ et un débit de 15 litres à la seconde, ou de $0^m,015$; suivons la ligne horizontale qui commence par $0^m,001$ jusqu'à ce que nous rencontrions le débit $0^m,015$, nous voyons qu'il correspond à un tuyau d'un diamètre intermédiaire entre $0^m,23$ et $0^m,25$; nous adopterons donc un diamètre de $0^m,24$, et la vitesse moyenne sera comprise entre $0^m.32$ et 0,335. Cette approximation est bien suffisante, eu égard à l'approximation des nombres fournis par l'expérience.

Calcul d'une distribution d'eau. — Il est facile maintenant de calculer

tous les éléments d'une artère : on part de l'extrémité de cette artère, on la divise par sections, et dans chaque section on détermine le débit.

On doit s'attacher à prendre comme base le débit maximum qui peut se produire : ainsi, il faut compter que toutes les bornes-fontaines seront ouvertes et débiteront chacune un litre par seconde, ainsi que les bouches d'arrosage, ce qui est la condition indispensable d'un bon fonctionnement. On évaluera avec soin les causes de consommation locales, telles que concession à une usine importante, alimentation d'un bassin, d'un jet d'eau, puis on ajoutera les quantités nécessaires au service des concessions futures, en tenant compte de l'importance des maisons et du nombre des habitants qu'elles peuvent renfermer, en tenant compte aussi, dans certains cas, de l'étendue des jardins à arroser.

Il va sans dire qu'il convient de se tenir très au large dans ces évaluations.

Partant de l'extrémité de l'artère, on saura quelle doit être la charge disponible à cette extrémité; de la connaissance du débit, on déduira le diamètre de la première section et la charge qu'il faut obtenir à son origine; de même pour la seconde section, et ainsi de suite, en remontant jusqu'au réservoir d'alimentation, dont le niveau se trouvera ainsi déterminé.

Nous engageons le lecteur à effectuer un calcul de ce genre, nous lui en avons fourni tous les éléments.

Conduite réunissant deux réservoirs. — Les formules relatives à une conduite qui réunit deux réservoirs, sans rien dépenser en route, sont données à la page 38 et accompagnées d'une application numérique, qu'il est inutile de reproduire.

Pertes de charge produites par les changements de diamètre, les branchements et les coudes. — Ces pertes de charge sont évaluées à la page 22 et aux pages suivantes.

Conduites équivalentes. — Une conduite ayant 1,000 mètres de longueur a un rayon de $0^m,15$ sur 150 mètres, de $0^m,20$ sur 250 mètres, de $0^m,10$ sur 400 mètres, et de $0^m,08$ sur 200 mètres, trouver une conduite équivalente de même longueur.

Le rayon de cette conduite est déterminé par la formule page 27 :

$$\frac{L}{R^5} = \frac{l}{r^5} + \frac{l'}{r'^5} + \frac{l''}{r''^5} + \ldots$$

La table II nous donne les valeurs des inverses des cinquièmes puissances des rayons et facilite le calcul. Le rayon R résulte de l'équation :

$$\frac{1}{R^5} = \frac{1}{1000} [150 \times 13168 + 250.3125 + 400.100000 + 200.305175] = 73278$$

et la table II nous apprend que R est compris entre $0^m,10$ et $0^m,108$. Le problème est donc rapidement résolu.

Nous avons donné cet exemple numérique afin de bien faire saisir tout le parti qu'on peut tirer de la table II.

Le lecteur pourra, grâce à cette table, faire rapidement l'application des formules exposées au chapitre premier, et notamment des formules qui se rapportent à l'alimentation par plusieurs réservoirs.

TABLE IV

RELATIONS ENTRE LES VOLUMES D'EAU A ÉCOULER SUIVANT L'UNITÉ DE TEMPS

VOLUMES D'EAU A ÉCOULER, EXPRIMÉS EN MÈTRES CUBES				
PAR SECONDE	PAR MINUTE	PAR HEURE	PAR JOUR	PAR AN
mc. 0,00002	mc. 0,0012	mc. 0,072	mc. 1,728	mc. 631
0,00004	0,0024	0,144	3,456	1261
0,00006	0,0036	0,216	5,184	1892
0,00008	0,0048	0,288	6,912	2523
0,0001	0,0060	0,360	8,640	3154
0,0002	0,012	0,720	17,28	6307
0,0003	0,018	1,08	25,92	9461
0,0004	0,024	1,44	34,56	12614
0,0005	0,030	1,80	43,20	15768
0,0006	0,036	2,16	51,84	18922
0,0007	0,042	2,52	60,48	22075
0,0008	0,048	2,88	69,12	25229
0,0009	0,054	3,24	77,16	28382
0,001	0,060	3,60	86,40	31536
0,002	0,120	7,20	173	63072
0,003	0,180	10,80	259	94608
0,004	0,240	14,40	346	126144
0,005	0,300	18,00	432	157680
0,006	0,360	21,60	518	189216
0,007	0,420	25,20	605	220752
0,008	0,480	28,80	691	252288
0,009	0,540	32,40	778	283824
0,010	0,600	36	864	315360
0,020	1,2	72	1728	630720
0,030	1,8	108	2592	946080
0,040	2,4	144	3456	1261440
0,050	3,0	180	4320	1576800
0,060	3,6	216	5184	1892160
0,070	4,2	252	6048	2207520
0,080	4,8	288	6912	2522880
0,090	5,4	324	7776	2838840
0,100	6	360	8640	3153600
0,200	12	720	17280	6307200
0,300	18	1,080	25920	9460800
0,400	24	1,440	34560	12614400
0,500	30	1,800	43200	15768000
0,600	36	2,160	51840	18921600
0,700	42	2,520	60480	22075200
0,800	48	2,880	69120	25228800
0,900	54	3,240	77760	28382400
1,000	60	3,600	86400	31536000

MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES
AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

17me FASCICULE

TRAITÉ DES EAUX

TROISIÈME PARTIE

MÉTÉOROLOGIE — HYDROLOGIE — CULTURE RATIONNELLE

24 Figures

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1875

PARIS. — TYPOGRAPHIE LAHURE
Rue de Fleurus, 9

MÉTÉOROLOGIE, HYDROLOGIE, CHIMIE AGRICOLE

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

CHAPITRE II.

Notions d'hydrologie.

CHAPITRE III.

Notions de chimie agricole.

TRAITÉ DES EAUX

TROISIÈME PARTIE

MÉTÉOROLOGIE. — HYDROLOGIE. — CULTURE RATIONNELLE

INTRODUCTION

Au moment d'aborder l'étude des eaux considérées dans leurs rapports avec l'agriculture, nous avons reconnu qu'il était utile de réunir en un seul corps les principales notions que l'on possède aujourd'hui sur la météorologie, l'hydrologie et les principes de la culture rationnelle. — Ces notions sont presque toutes récentes ; elles ont été mises en lumière dans ces dernières années par des hommes éminents, astronomes, ingénieurs, agriculteurs, chimistes, dont les efforts réunis ont ouvert une voie nouvelle et féconde aux applications de la science. — Malheureusement, ces notions sont éparses dans de nombreux écrits ; notre tâche modeste a consisté à les réunir et à les résumer ; nous espérons que notre travail, en évitant des recherches à beaucoup d'ingénieurs, ne leur sera pas inutile.

Les principaux ouvrages que nous avons consultés sont les suivants :

Annuaire météorologique et agricole de Montsouris. Cet annuaire, qui paraît depuis 1871 sous l'habile direction de M. Marié-Davy, le fondateur de l'Observatoire de Montsouris, est une publication éminemment utile, indispensable à quiconque veut s'occuper de météorologie, d'hydrologie et d'agriculture. Sous un petit volume, M. Marié-Davy est arrivé à condenser chaque année une multitude de faits et d'expériences.

Météorologie de Kaëmtz.

Instructions météorologiques, de M. Renou.

Études hydrologiques sur le bassin de la Seine et mémoires divers de M. Bel-

grand, le savant directeur des eaux de Paris, qui a eu l'honneur d'être un des premiers à faire ressortir l'importance capitale du genre d'études qui nous occupe.

Traité d'hydraulique et de géologie agricole, de M. l'ingénieur Duponchel.

Études hydrologiques sur les monts Jura, de M. l'ingénieur Lamairesse.

Les observations météorologiques aux États-Unis, de M. l'ingénieur en chef Malézieux.

Régime des pluies dans le bassin de la Meuse, par M. l'ingénieur Poincaré.

Résumé annuel des observations météorologiques du bassin de la Seine, par M. l'ingénieur Lemoine, sous la direction de M. Belgrand.

Étude sur les torrents des hautes Alpes, par MM. les ingénieurs Surell et Cézanne.

Mémoire sur le régime général des eaux courantes, par M. Thomé de Gamond.

Annuaire du bureau des longitudes et notice sur la *Loi des tempêtes*, par M. Faye.

Météorologie nautique, de MM. Ploix et Caspari. Cet ouvrage, écrit pour les navigateurs, renferme de précieux renseignements sur les vents et sur les mouvements généraux de l'atmosphère.

Revue de géologie, de MM. Delesse et de Lapparent.

Rapports sur l'agriculture, à l'Exposition universelle de 1867, publiés par le jury international.

CHAPITRE PREMIER

OBJET DE LA MÉTÉOROLOGIE

La météorologie est la science des phénomènes atmosphériques.

Elle a des liens intimes : 1° avec l'hydrologie, qui s'occupe de l'écoulement des eaux à la surface comme à l'intérieur du sol ; 2° avec l'agriculture, dont la fortune est principalement soumise aux influences atmosphériques.

Depuis longtemps, l'homme connaît la surface de la terre ; il en a reproduit le relief et les accidents sur des cartes nombreuses. Mais ce relief ne se modifie que lentement à nos yeux, qui le saisissent sans peine.

Il n'en est pas de même des formes mobiles que présentent les courants de l'Océan et de l'atmosphère.

Nous parlerons plus tard des mouvements de la mer et des variations que l'on rencontre dans sa constitution physique ; ici, nous ne nous occuperons que des courants de l'atmosphère et des phénomènes qui se passent dans cet immense laboratoire.

Tout d'abord, en présence des variations fréquentes qui, sans cause apparente, se produisent dans l'état atmosphérique, on se demande si ces variations sont soumises à des lois qu'il soit possible de découvrir. Cependant, si l'on remarque que, depuis les temps les plus reculés, l'expérience populaire a reconnu certains rapports entre des phénoménes tout différents, tels que le vent et la pluie, on reconnaît qu'il doit exister des relations précises entre les divers météores et que, si les causes sont difficiles à découvrir, c'est qu'il faut les aller chercher bien loin de leurs effets. L'étude de l'atmosphère ne peut donc être abordée par un seul expérimentateur ; elle exige une armée d'observateurs répartis sur la surface du globe. La comparaison des résultats fournis par tous permet de suivre dans leur route et de fixer sur une carte ces grands mouvements qui ressemblent de tous points aux ondulations et aux courants de l'Océan.

La météorologie ne se propose pas seulement de rechercher les lois des phénomènes de l'atmosphère ; elle a un but plus pratique et plus utile : elle veut et elle doit arriver à la prévision du temps.

Est-il besoin de dire toute l'importance qui s'attache à la prévision du temps ? Les marins de nos côtes, avertis de l'approche de la tempête, rentreront au port et se mettront à l'abri ; bien des vies seront conservées et bien des ruines évitées. L'agriculteur, prévenu du mauvais temps quelques jours l'avance, se hâtera de prendre les mesures nécessaires au salut de ses récoltes.

Les phénomènes météorologiques semblent tenir à une cause principale : l'action calorifique du soleil, qui s'exerce inégalement aux divers points du globe. Cette cause principale doit entraîner une marche générale constante des phénomènes ; sans doute, bien des causes locales interviennent pour modifier les courants et les ondulations de cette mer atmosphérique au fond de laquelle nous vivons ; mais l'allure et la direction générales de ces courants et de ces ondulations ne sauraient être complétement transformées par les accidents locaux. C'est là ce qui permet de prédire, avec une approximation toujours croissante, le temps probable qui se prépare pour l'ensemble d'une contrée.

HISTOIRE DE LA MÉTÉOROLOGIE.

Dans son annuaire météorologique de 1872, le savant directeur de l'Observatoire de Montsouris, M. Marié-Davy, a montré que la météorologie n'était pas une science absolument nouvelle, bien qu'elle ait fait depuis trente ans ses plus sérieux progrès, et il a donné de cette science un historique complet que nous allons résumer :

L'astronome Picard et le médecin Morin semblent avoir été les premiers qui, dans la seconde moitié du dix-septième siècle, commencèrent à tenir registre des changements de l'atmosphère.

En 1688, l'Académie résolut de charger constamment un de ses membres de noter les variations du temps et les phénomènes météorologiques. Les observateurs successifs furent MM. Sedilleau, de la Hire père et fils, les Maraldi, Cassini, Fouchy et l'abbé Chappe.

En 1730, Réaumur, par l'invention de son thermomètre, fit faire un pas immense aux études qui nous occupent.

En 1741, Duhamel publia un recueil d'observations botanico-météorologiques ; il avait compris l'alliance intime de l'agriculture et de l'étude des phénomènes atmosphériques :

« Il est certain, dit-il, que les biens de la campagne, ces biens si nécessaires qu'on peut les considérer comme les seuls vrais biens, les blés, les vins, les chanvres, les fruits, les bois, etc., ne viennent pas tous les ans aussi abondamment ni d'aussi bonne qualité, et l'on sait, en général, que ces variétés dépendent de la différente température des saisons.

« Mais ces connaissances générales ne suffisent pas et l'on conviendra qu'il serait également utile pour l'agriculture et pour la physique de connaître plus positivement le rapport qu'il y a entre la température des saisons et les productions de la terre.

« On sent, du reste, que la connaissance de ce rapport peut, dans la suite conduire insensiblement à celle des principaux phénomènes de la végétation, de même qu'à apercevoir l'effet que telle ou telle circonstance dans les saisons peut produire sur les végétaux ; or, dans quantité de cas de cette espèce, il est souvent très-avantageux de prévoir, ne fût-ce qu'à peu près, puisque quelquefois on sera à portée de prévoir une partie des accidents et que dans d'autres cas on s'épargnera bien des inquiétudes. »

En 1746, M. Malouin entreprit une série d'observations sur l'effet des variations de l'air dans les différentes maladies.

A la fin du dix-huitième siècle, l'illustre Lavoisier s'exprimait ainsi :

« La prévision des changements qui doivent arriver au temps est un art qui a ses principes et ses règles. Les données nécessaires pour cet art sont : l'observation habituelle et journalière des variations de la hauteur du mercure dans le baromètre, la force et la direction des vents à différentes élévations, l'état hygrométrique de l'air, sa température... Avec toutes ces données, il est presque toujours possible de prévoir un jour ou deux à l'avance, avec une très-grande probabilité, le temps qu'il doit faire. »

Sous le ministère de Chaptal, les idées de Lavoisier furent reprises par Delamarck et on institua au ministère de l'intérieur un service de statistique météorologique qui fonctionna jusqu'en 1809. Dans son rapport au ministre, Delamarck fait remarquer qu'un observateur isolé peut se livrer à d'intéressantes études sur la composition de l'atmosphère et sur le climat de son pays. mais que les vraies connaissances météorologiques ne peuvent être obtenues qu'avec le concours de recherches, d'observations et d'efforts réunis.

De 1809 à 1831, les études météorologiques semblent abandonnées. Elles se réveillèrent et prirent leur essor en 1831 avec le lieutenant américain Maury.

Maury est né en 1806 dans l'État de Virginie ; il est mort en 1873 ; il avait pris parti pour son pays lors de la guerre de sécession et dut quitter le poste de directeur de l'Observatoire de Washington, qu'il occupait avec tant d'éclat. Maury est le créateur de la météorologie nautique ; il dépouilla les observations inscrites aux journaux de bord de tous les navires, il en recueillit et en ordonna de nouvelles, ce qui lui permit de dresser ses belles cartes des vents et des courants, et d'indiquer les meilleures routes à suivre dans l'Océan, c'est-à-dire celles qui permettent à un navire à voiles d'accomplir une traversée dans le moindre temps possible.

L'application du télégraphe à la météorologie remonte déjà à quelques années : elle ne fut sérieusement adoptée qu'en 1855 sur l'invitation du maréchal Vaillant. — Les tempêtes s'avancent avec une vitesse incomparablement inférieure à la vitesse de l'électricité ; le télégraphe peut donc les annoncer aux contrées menacées ; un ouragan qui prend naissance aux côtes de l'Amérique peut être signalé à l'Europe quelques jours avant qu'il ne l'atteigne ; il peut même être devancé par les paquebots transatlantiques.

Depuis 1859 est organisé le système d'avertissement aux ports par voie télégraphique : les ports eux-mêmes adressent à Paris le bulletin quotidien de l'état de l'atmosphère.

Les bulletins quotidiens du temps et des crues ont même été adoptés sur certains points en vue des travaux de l'agriculture et des inondations. — M. l'ingénieur Poincaré a organisé ce système dans la vallée de la Meuse ; sur les fleuves, l'annonce des crues se fait aussi par le télégraphe, et une ligne spéciale a été établie le long de la Seine.

« L'intérêt capital, au point de vue de l'agriculture, dit M. Marié-Davy, consisterait à préjuger à la fin d'une année agricole les caractères généraux de l'année suivante, afin de mettre les cultivateurs en état de régler de la manière la plus fructueuse la campagne qu'ils vont entreprendre, et qui, une fois commencée, ne peut plus être modifiée à leur gré. C'est là une très-grosse question. Pour entreprendre de la résoudre, il faut réunir non seulement les documents actuels recueillis chaque jour à la surface du globe, mais encore les documents rétrospectifs remontant aussi loin qu'il est possible dans le passé. — Il faut, de plus, le concours direct des agriculteurs, comme les travaux de météorologie

nautique exigent de la part des marins un concours qui devient chaque jour plus actif et plus général. »

Les écoles normales primaires, institutions permanentes établies dans presque tous les départements, étaient bien placées pour recueillir les observations de météorologie agricole; plusieurs d'entre elles sont déjà arrivées à d'importants résultats.

D'un autre côté, sous l'impulsion de l'Observatoire de Paris, des commissions départementales se sont créées de toutes parts; grâce à leur concours, on peut dresser les cartes des orages, les cartes des pluies, les cartes relatives à la climatologie et à l'agronomie de la France.

Aujourd'hui les phénomènes atmosphériques, dans leurs rapports soit entre eux, soit avec l'agriculture, sont donc sérieusement étudiés; la météorologie peut conduire à des résultats d'une utilité tellement évidente, que chacun doit lui prêter son concours.

DES DIVERSES OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES.

Les observations météorologiques doivent, en un point donné, porter sur les phénomènes suivants :

1° La pression atmosphérique, indiquée par le baromètre;

2° La température atmosphérique, indiquée par le thermomètre;

3° Le degré d'humidité indiqué par l'hygromètre;

4° Le vent; sa force et sa direction sont indiquées par la girouette;

5° L'état du temps, brouillard, pluie, neige, etc....; se reconnaît par l'observation directe; la pluie et la neige se mesurent par l'udomètre ou pluviomètre;

6° La lumière et la chaleur rayonnante; c'est la chaleur du soleil qui fournit la force vive à la végétation; il importe d'apprécier cette chaleur; les radiations solaires se mesurent au moyen de l'actinomètre;

7° L'évaporation, qui se mesure directement et qui a des rapports intimes avec la culture du sol;

8° Le magnétisme terrestre, qui se manifeste par les boussoles de déclinaison et d'inclinaison; les aurores boréales semblent intimement liées au magnétisme terrestre;

9° L'état électrique de l'atmosphère, qui paraît exercer quelque influence sur la végétation.

Les observations des quatre derniers ordres sont peu répandues; les précédentes le sont beaucoup plus. — Les stations sont généralement pourvues d'un baromètre, de thermomètres, et d'un pluviomètre; l'hygromètre manque trop souvent; c'est, en effet, un instrument moins pratique et d'un usage plus délicat, mais qui fournit de précieuses indications.

Nous allons étudier successivement les neuf espèces d'observations que nous venons de définir.

1° PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — BAROMÈTRES.

Si l'on prend un tube en verre, d'environ 0m,90 de long, ouvert à un bout. et fermé à l'autre, qu'on le remplisse de mercure et qu'on le renverse dans une cuvette pleine elle-même de mercure, en évitant avec soin l'introduction de l'air dans le tube, on reconnaît que le métal liquide ne descend pas tout entier dans la cuvette; il en reste dans le tube une colonne dont la hauteur moyenne sous notre climat est de 0m,755. Cette colonne fait équilibre à la pression atmosphérique, qui par suite est égale à un poids de 1kg,033 par centimètre carré.

La pression atmosphérique est variable avec le temps; ses variations sont accusées par les variations de hauteur de la colonne barométrique. — L'observation du baromètre permet donc de les mesurer.

Il est facile de construire un baromètre : il faut prendre un tube que l'on nettoie soigneusement avec de l'eau et de l'acide nitrique, puis on le sèche et on le remplit de mercure que l'on porte à l'ébullition dans le tube même, enfin on le renverse dans une cuvette contenant du mercure purifié.

Baromètre étalon. Le baromètre étalon, qu'on ne trouve que dans les établissements scientifiques, est ordinairement mis sous la forme que lui a donnée M. Regnault, au Collége de France. — Le tube de verre a 2 ou 3 centimètres de diamètre, afin de supprimer l'influence de la capillarité; il est accolé à une planche verticale et plonge par le pied dans une assez large cuvette.

La cause d'erreur dont sont affectés les baromètres ordinaires est la suivante : on accole au tube sur la planchette une graduation verticale dont le zéro correspond au niveau moyen de la cuvette. Si la colonne barométrique baisse, il rentre du mercure dans la cuvette et le niveau s'élève au-dessus du zéro, on lit donc une hauteur trop forte; inversement, si la colonne barométrique s'élève, le niveau dans la cuvette s'abaisse au-dessous du zéro et on lit sur l'échelle une hauteur trop faible. — Il faut donc adopter pour la cuvette des dimensions très-grandes par rapport au diamètre du tube, ou bien adopter deux échelles : placer le zéro au-dessus de la cuvette et mesurer, d'une part, la hauteur de la colonne mercurielle au-dessus, d'autre part, la profondeur du niveau de la cuvette au-dessous du zéro; l'addition de ces deux quantités donne exactement la pression.

C'est ainsi qu'on opère avec le baromètre étalon, en prenant toutefois des précautions spéciales (fig. 1) :

Au-dessus de la cuvette on voit une vis verticale *v*, à deux pointes, mobile dans un écrou *m*; lorsqu'on veut mesurer la hauteur de la colonne, on amène la pointe inférieure de la vis à l'affleurement avec la surface du mercure dans la cuvette; l'affleurement s'obtient avec la plus grande exactitude en observant l'image de la pointe qui s'avance peu à peu jusqu'à toucher la pointe elle-même; à ce moment l'affleurement est parfait.

Un cathétomètre est placé à quelque distance de l'appareil; on vise avec sa lunette, d'abord la pointe supérieure de la vis *v* puis le sommet *a* de la colonne mercurielle et on lit sur l'échelle verticale, la hauteur qui sépare ces deux points; ajoutant la hauteur constante de la vis, on obtient celle de la colonne barométrique.

Pour avoir des observations comparables entre elles quelle que soit la température, on les ramène toutes à 0°; en effet, le mercure se dilate à mesure que la température s'élève et sa densité diminue; pour faire équilibre à une même pression atmosphérique, il faudra donc une colonne de mercure plus haute à 20° qu'à 0°, à 30° qu'à 20°, etc.... — Inversement, pour des températures inférieures à 0°, la hauteur de mercure correspondant à une même pression diminue, car le métal liquide se contracte et augmente de densité.

On voit, par suite, qu'il y a nécessité de ramener toutes les observations à la même température : on a choisi la température de la glace fondante, c'est-à-dire 0°.

Il faut donc inscrire, à côté de toute observation barométrique, la température de l'appareil : à cet effet, tout baromètre porte avec lui son thermomètre, qui donne la température de l'atmosphère ambiante et par suite à peu près celle de la colonne mercurielle.

Avec le baromètre étalon, que représente la figure ci-jointe, il faut une exactitude absolue; c'est pourquoi le thermomètre *t* plonge dans un bout de tube D plein de mercure, de même diamètre que le tube barométrique T.

Le thermomètre *t* est observé à distance avec la lunette du cathétomètre.

Fig. 1.

Connaissant le coefficient de dilatation du mercure dans le verre, il est facile de calculer ce que serait à 0° la hauteur de la colonne de mercure observée à une température connue.

Pour éviter à chaque observation un calcul assez long, on a calculé une table qui donne, en millimètres et dixièmes de milimètres, les corrections à faire subir aux hauteurs observées.

Nous reproduirons cette table telle qu'on la trouve dans l'Annuaire météorologique :

TABLE POUR LA RÉDUCTION DU BAROMÈTRE A ZÉRO.

TEMPÉRATURE DU BAROMÈTRE.	HAUTEURS DU BAROMÈTRE.								
	700	710	720	730	740	750	760	770	780
0°	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}	0,0^{mm}
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
10	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
11	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
12	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
13	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
14	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8

TABLE POUR LA RÉDUCTION DU BAROMÈTRE A ZÉRO (SUITE).

TEMPÉRATURE DU BAROMÈTRE.	HAUTEURS DU BAROMÈTRE.								
	700	710	720	730	740	750	760	770	780
15	1,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9
16	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
17	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1
18	2,0	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3
19	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4
20	2,3	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5
21	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
22	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8
23	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9
24	2,7	2,7	2,8	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0
25	2,8	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1
26	2,9	3,0	3,0	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3
27	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3	3,4	3,4
28	3,2	3,2	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5
29	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,6
30	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8
31	3,5	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9
32	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0

Cette table s'applique à tous les baromètres à mercure avec tube de verre ; tout observateur doit la posséder et en faire constamment usage.

Exemple : On a observé une pression de 760 millimètres à la température de 15° au-dessus de zéro, quelle est la hauteur représentative de cette pression rapportée à 0° ?

La pression observée est de.	760 millimèt.
La correction, d'après la table, pour une température de 15°, est de. . .	1,8
Il faut donc mesurer la pression réelle par le nombre.	758,2

S'il s'agissait de températures inférieures à zéro, on aurait observé une hauteur trop faible et la correction devrait non se retrancher, mais s'ajouter.

Ainsi, dans le cas précédent, si la température avait été de 15° au-dessous de zéro, la hauteur barométrique, réduite à zéro, eût été de 761^{mm},8.

Baromètre de Fortin. Instruction pour l'observateur. — Le baromètre dont sont munies toutes les stations météorologiques fondées par l'Observatoire est le baromètre de Fortin.

La figure 3 représente le tube barométrique dans la partie que parcourt le sommet de la colonne, et la figure 2 représente le pied du tube avec la cuvette à fond mobile.

Le fond mobile est une peau de chamois fixée au cylindre en buis K et ce fond est soulevé ou abaissé à volonté par la vis V qui traverse la boîte en laiton entourant la cuvette. Le cylindre K s'emboîte à pas de vis sur le cylindre A et la partie supérieure de la cuvette est formée par un cylindre en verre *cc* que sur-

monte un couvercle A′ en bois muni d'un goulot K′, par lequel descend le tube barométrique E. Le couvercle en bois est lui-même recouvert d'une garniture en laiton T′, et cette garniture supérieure est invariablement reliée à la garniture inférieure par les tiges boulonnées *a*,*a*′.

Le tube barométrique se termine en pointe, disposition qui empêche l'introduction accidentelle des bulles d'air ; à son passage dans le goulot en bois K′K′, il présente un étranglement E ; une peau de chamois est fixée d'un bout sur cet étranglement et d'autre bout sur la tubulure K′. Cette peau de chamois laisse



Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.

passer l'air extérieur qui vient exercer sa pression sur le mercure dans la cuvette ; elle permet en outre une certaine mobilité du tube barométrique par rapport à la cuvette.

Lorsqu'on est en station et qu'on veut faire une observation, on manœuvre doucement la vis V jusqu'à ce qu'on ait amené l'aiguille d'ivoire P en contact avec la surface du mercure ; le contact s'établit quand l'image de la pointe vient toucher la pointe elle-même.

La pointe de l'aiguille correspond au zéro de la colonne barométrique.

Le tube en verre est enfermé dans une gaîne en laiton, dans laquelle sont ménagées, vers le sommet de la colonne mercurielle, deux fenêtres opposées permettant d'apercevoir le ménisque, figure 3 ; sur le bord vertical d'une fenêtre est gravée la graduation de l'échelle en centimètres et millimètres ; le long de la gaîne en laiton se meut un curseur D, à double fenêtre, portant un vernier accolé à l'échelle du baromètre ; le bord supérieur *m* du curseur est amené en contact avec le sommet de la colonne et on apprécie, grâce au vernier, la hauteur barométrique à $\frac{1}{20}$ de millimètre.

Le baromètre porte avec lui son thermomètre *t* ; lorsqu'on doit le changer de place, il repose sur un trépied et est suspendu par une suspension à la Cardan qui lui permet d'occuper naturellement une direction verticale.

On sait que la capillarité affecte la hauteur de la colonne barométrique, surtout lorsque le tube en verre est de petit diamètre ; le mercure prend la forme d'une calotte ou ménisque convexe et l'adhérence du verre diminue un peu la hauteur de la colonne de mercure ; généralement, on ne fait pas la correction de la capillarité; mais on peut l'obtenir en observant à l'aide du vernier la flèche, c'est-à-dire la hauteur du ménisque et en connaissant le diamètre intérieur du tube. La table suivante donne alors la valeur de la correction.

DÉPRESSION DE LA COLONNE BAROMÉTRIQUE DUE A LA CAPILLARITÉ.

RAYON DU TUBE EN MILLIMÈTRES.	CORRECTION POUR DES HAUTEURS DE MÉNISQUE ÉGALES EN MILLIMÈTRES A					
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
2,0	0,6	1,16	1,65	2,05	2,35	»
2,6	0,34	0,66	0,96	1,22	1,41	1,61
3,0	0,24	0,48	0,70	0,90	1,07	1,21
3,6	0,16	0,31	0,46	0,59	0,71	0,81
4,0	0,12	0,24	0,36	0,46	0,55	0,64
4,6	0,08	0,16	0,24	0,32	0,38	0,45

Il faudrait recourir à cette table si l'on se servait de tubes barométriques de petit diamètre, Comme le diamètre est généralement supérieur à 0^{m}.01 la correction due à la capillarité peut être négligée.

Pour terminer ce qui est relatif à l'usage du baromètre, nous emprunterons les lignes suivantes aux instructions publiées par M. Marié-Davy pour les observations météorologiques des écoles normales :

« L'instrument sera placé près du jour, dans une chambre sans feu, à l'abri des rayons du soleil ; il sera suspendu par son anneau supérieur, de manière à prendre de lui-même la position verticale, et sera fixé dans cette position. A cet effet, le baromètre est accompagné d'une planche munie à son extrémité supérieure d'une potence en fer destinée à porter l'instrument, et à son extrémité inférieure d'un anneau garni de trois vis calantes. On fixe la planche à un mur dans une position telle que, le baromètre étant suspendu librement à la potence, l'axe de sa cuvette passe par le centre de l'anneau. La cuvette est alors serrée légèrement par les vis calantes. »

Lorsqu'on veut observer le baromètre, on commence par lire et noter la tem-

pérature du thermomètre accolé à l'instrument, puis on détermine l'affleurement du mercure et de la pointe d'ivoire de la cuvette, comme nous l'avons dit plus haut.

« L'affleurement étant obtenu, on donne avec le doigt quelques petits chocs à l'instrument pour vaincre l'adhérence du mercure au verre, et rendre à la capillarité, dans le tube barométrique, sa valeur normale. Cette opération ne change pas, d'une manière sensible, l'affleurement du mercure dans la cuvette, ce dont il convient de s'assurer d'ailleurs. On fait ensuite mouvoir le curseur de la tige du baromètre jusqu'à ce que l'œil, placé dans le plan des deux bords supérieurs de la double fenêtre du curseur, cesse d'apercevoir du jour entre ces bords et le sommet arrondi du mercure. Cette opération se trouve également facilitée par une feuille de papier blanc bien éclairée que l'on pose en arrière du baromètre. »

On voit que la division finale du vernier est placée au sommet de la fenêtre du curseur, elle correspond donc au sommet de la colonne barométrique. On commence par lire exactement sur l'échelle le nombre entier des millimètres de la colonne; puis on observe quelle est la division du vernier qui se trouve en face, ou à peu près, d'une division de l'échelle, le numéro de cette division du vernier indique le nombre de fractions de millimètres à ajouter à la cote précédente. La valeur des fractions de millimètre répond à la graduation du vernier : s'il porte 20 divisions occupant une longueur totale de 19 millimètres, on apprécie les vingtièmes de millimètre. Généralement le vernier n'a que dix divisions correspondant à une hauteur totale de 9 millimètres et on se contente d'apprécier les dixièmes de millimètre.

Si l'on compare un baromètre ordinaire à un baromètre étalon, il présente toujours une légère différence constante; c'est l'erreur propre de l'instrument, due à sa graduation. Chaque baromètre, expédié par l'Observatoire, est enregistré avec un numéro d'ordre en face duquel on inscrit l'erreur constante. Le numéro et la valeur de l'erreur en millimètres sont répétés sur l'appareil lui-même.

Il faut éviter de déplacer un baromètre, parce qu'on risque toujours de voir une bulle d'air s'introduire à l'intérieur; cependant, le baromètre de Fortin est transportable si l'on a soin de remonter complétement la vis V pour remplir intégralement la cuvette et en chasser l'air; on renverse ensuite l'instrument et on le transporte dans cet état[1].

Corrections du baromètre dues à l'altitude. — La pression atmosphérique est due au poids de l'atmosphère qui règne au-dessus de la station considérée; à mesure que l'on s'élève, la colonne atmosphérique diminue de hauteur et l'air se raréfie; on est dans la situation d'un plongeur qui remonte du fond de la mer à la surface. Ainsi, la hauteur barométrique moyenne d'une station est très-variable avec l'altitude; lorsqu'on parle de la pression moyenne d'un pays, on entend que cette pression est comptée au niveau de la mer.

Lorsqu'on établit une station, il faut en connaître l'altitude afin de pouvoir calculer la correction due à cette altitude et rapporter les observations à ce qu'elles seraient au niveau de la mer.

[1] Nous ne parlons pas des baromètres anéroïdes (sans liquide), baromètres métalliques dont l'usage est bien connu. Ils ne doivent pas être admis dans les stations à terre; mais ils rendent de grands services à la mer, ainsi que pour les observations terrestres nécessitant des déplacements; il faut les comparer fréquemment à un baromètre étalon.

Cette opération s'effectue au moyen de la formule de Laplace :

$$Z = 18336^{m} \log.\frac{H}{h}\left[\left(1+\frac{2(t+t')}{1000}\right)(1+0{,}00265\cos 2L)\left(1+\frac{Z+15926}{6366198}+\frac{s}{3183099}\right)\right] \quad (1)$$

Dans cette formule les lettres ont la signification suivante :

H et t, hauteur et température du baromètre à la station inférieure,
h et t' — — supérieure,
Z, différence d'altitude des deux stations,
L, latitude du pays où l'on opère,
s, altitude de la station inférieure.

La station inférieure est au niveau de la mer, donc il faut remplacer s par zéro ; de plus les baromètres sont censés ramenés à 0°, dont t et t' sont nuls. La formule se simplifie et devient :

$$(2) \qquad Z = 18336.\log\frac{H}{h}\left[(1+0{,}00265.\cos 2L)\left(1+\frac{Z+15926}{6366198}\right)\right]$$

Le tableau du paragraphe ci-après donne la valeur de la hauteur barométrique H au niveau de la mer et à la latitude considérée ; il n'y a donc que h d'inconnu dans la formule et la valeur de cette inconnue est facile à calculer.

Exemple. La pression barométrique en France, au niveau de la mer, étant en moyenne de $0^{m},760$, quelle sera cette moyenne à l'observatoire de Genève qui est situé à 408 mètres au-dessus du niveau de la mer ?

La latitude de la France est d'environ 45°, donc (*cos.* 2L) est sensiblement nul, et la formule devient :

$$(3) \qquad \log\frac{H}{h} = \frac{408}{18336}\cdot\frac{1}{1+\frac{408+15926}{6366198}} = \frac{408}{18336}\cdot\frac{1}{1{,}025} = \frac{408}{18794} = 0{,}02171$$

d'où l'on tire :

$$(4) \qquad \log.h = \log.H - 0{,}02171 = \bar{1},88081 - 0{,}02171 = \bar{1},85910.$$

La table de logarithmes donne pour la valeur de h le nombre... $0^{m},723$.

Ainsi la pression moyenne du baromètre à Genève est de $0^{m},723$, en admettant que la pression au niveau de la mer est de $0^{m},76$.

Cette application suffira pour guider le lecteur dans tous les cas analogues.

VARIATIONS BAROMÉTRIQUES EN DIVERS POINTS DU GLOBE.

Tout ce qui modifie la composition et l'état physique de l'air atmosphérique entraîne une variation dans la pression atmosphérique et par suite dans la hauteur barométrique.

L'étude de ces variations accidentelles est, comme nous le verrons plus tard, fort importante en ce qui touche les prévisions du temps.

Pour le moment, nous ne nous occuperons que des variations régulières et périodiques.

Hauteur moyenne du baromètre suivant la latitude. — Voici, d'après Maury, la hauteur moyenne du baromètre à la mer pour diverses latitudes :

HAUTEUR MOYENNE DU BAROMÈTRE AU NIVEAU DE LA MER.

LATITUDE DU LIEU D'OBSERVATION. (HÉMISPHÈRE NORD.)	HAUTEUR BAROMÉTRIQ. MOYENNE. EN MILLIMÈTRES.	LATITUDE DU LIEU D'OBSERVATION (HÉMISPHÈRE SUD.)	HAUTEUR BAROMÉTRIQ. MOYENNE EN MILLIMÈTRES.
degrés	millimèt.	degrés	millimèt.
0 à 5	759,8	0 à 5	760,5
5 à 10	760,0	5 à 10	761,5
10 à 15	761,1	10 à 15	762,7
15 à 20	762,4	15 à 20	763,5
20 à 25	764,0	20 à 25	764,6
25 à 30	765,8	25 à 30	764,4
30 à 35	767,3	30 à 36	763,3
35 à 40	765,2	40 à 43	761,7
40 à 45	763,9	43 à 45	756,4
45 à 50	763,5	45 à 48	752,6
50 à 55 (Angleterre.)	760,7	48 à 50	752,5
59°,51' (Saint-Pétersbourg.)	758,9	50 à 53	748,8
78°,37' (D' Kane.)	755,9	53 à 55	745,7
		56 1/2	744,0

Ainsi, la pression atmosphérique moyenne croît de l'équateur jusqu'à un maximum situé près des tropiques, entre 30° et 35° latitude nord, entre 20° et 25° latitude sud. A partir de ces maximums, la pression atmosphérique décroît avec la latitude; on ne sait pas ce qu'elle serait au voisinage du pôle. Cependant elle paraît s'accroître dans l'hémisphère nord à partir de la latitude 70°.

A l'équateur, le soleil darde d'aplomb ses rayons sur la terre; c'est là qu'il envoie le maximum de chaleur; l'air en contact avec le sol s'échauffe et s'élève en se dilatant; il n'est donc pas étonnant que la pression aille en croissant jusqu'à une certaine distance de chaque côté de l'équateur.

Variations diverses du baromètre. — Humboldt a montré que le baromètre était soumis à des oscillations diurnes très-régulières. Dans nos climats, ces oscillations, dont l'amplitude est assez faible, se trouvent masquées par les perturbations accidentelles beaucoup plus considérables; cependant il a été facile de les observer et de les mesurer.

Entre l'équateur et les tropiques, les variations diurnes ont une amplitude notable; elles s'effectuent avec une telle régularité qu'elles permettent de trouver l'heure, à un quart d'heure près, par l'observation du baromètre.

Voici, d'après l'Annuaire météorologique, les variations diurnes du baromètre à diverses latitudes:

LOCALITÉS.	OSCILLATIONS DIURNES DU BAROMÈTRE EN MILLIMÈTRES.
Amérique équatoriale, entre 23° N et 12° S.	2,55
Quito, au Pérou, latitude 0°, altitude 2,908m.	2,82
Payta, au Pérou, au niveau de la mer, latitude 5°.	3,40

LOCALITÉS.	OSCILLATION DIURNE DU BAROMÈTRE EN MILLIMÈTRES.
Santa-Fe de Bogota, 4°,35′ N., altitude 2,661ᵐ.	2,39
Rio de Janeiro, latitude 22°,54′ S., niveau de la mer.	2,34
Las Palmas, Canaries, latitude 28°8′ N.	1,10
Le Caire, ... latitude 30°,3′.	1,75
Toulouse, ... — 43°,34′.	1,20
Chambéry, ... — 45°,34′ altitude 267ᵐ.	1,00
Clermont-Ferrand. . . . — 45°,46′ — 409ᵐ.	0,94
Strasbourg. . . . . . . — 48°,34′.	0,80
Paris, observatoire. . . — 48°,50′.	0,76
La Chapelle près Dieppe, — 49°,55′.	0,36
Kœnigsberg. . . . . . . — 54°,52′.	0,20

Dans une même journée, la hauteur de la colonne barométrique présente deux maxima et deux minima ; les observations anglaises indiquent que dans les régions tropicales :

Les maxima se produisent vers 9 heures 1/2 du matin et 9 heures 3/4 du soir.
Les minima — 3 heures 3/4 — 4 heures du soir.

VARIATIONS DIURNES DU BAROMÈTRE, A PARIS

(MOYENNES MENSUELLES.)

MOIS.	1ʳᵉ SÉRIE. — DE 1816 A 1826.					2ᵉ SÉRIE. — DE 1856 A 1869.				
	9 heures du matin.	3 heures du soir.	9 heures du soir.	Différence de 9 h. mat. à 3 h. soir.	Différence de 3 h. soir à 9 h. soir.	9 heures du matin.	3 heures du soir.	9 heures du soir.	Différence de 9 h. mat. à 3 h. soir.	Différence de 3 h. soir à 9 h. soir.
Janvier. . .	758,1	757,4	757,7	— 0,7	+ 0,3	756,8	756,2	756,6	— 0,6	+ 0,4
Février. . .	758,2	757,3	757,6	0,9	0,3	758,6	757,9	758,5	0,7	0,6
Mars. . . .	756,2	755,4	755,8	0,8	0,4	753,9	753,0	753,5	0,9	0,5
Avril. . . .	755,3	754,3	754,8	1,0	0,5	755,9	754,9	755,4	1,0	0,5
Mai.	755,3	754,4	754,8	0,9	0,4	755,2	754,4	755,1	0,8	0,7
Juin. . . .	757,3	756,6	756,9	0,7	0,3	757,3	756,6	557,1	0,7	0,5
Juillet. . .	756,6	755,8	756,1	0,8	0,3	757,3	756,6	757,0	0,7	0,4
Août. . . .	756,8	756.0	756,3	0,8	0,3	756,6	755,7	756,2	0,9	0,5
Septembre.	756,8	756,0	756,4	0,8	0,4	756,6	755,7	756,3	0,9	0,6
Octobre. . .	754,8	754,0	754,5	0,8	0,5	756,2	755,4	756,0	0,8	0,6
Novembre .	755,8	755,3	755,7	0,5	0,4	756,8	756,1	756,7	0,7	0,6
Décembre. .	755,2	754,7	755,0	0,5	0,3	757,7	757,1	757,5	0,6	0,4

Ainsi, en moyenne, de neuf heures du matin à trois heures du soir, le baromètre décroît de huit dixièmes de millimètre et de trois heures à neuf heures du soir il croît de cinq dixièmes de millimètres.

« La cause des variations diurnes du baromètre, dit M. Marié-Davy, est intimement liée au mouvement de la chaleur dans les couches de l'atmosphère en contact avec le sol. Dans la matinée, l'air s'échauffe et tend à se dilater ; mais pour y parvenir, il lui faut refouler les couches supérieures : de là l'excès de pression du matin. Un peu plus tard, l'obstacle à la dilatation de l'air compense de moins en moins l'effet de la dilatation elle-même et de la diminution de densité qui en résulte ; le baromètre baisse jusqu'au moment où, l'air inférieur ayant commencé à se refroidir et à se contracter, les couches supérieures commencent à obéir au mouvement de recul qui en est la conséquence : c'est le

moment du minimum. L'oscillation diurne du baromètre sera donc d'autant plus grande que la variation diurne du thermomètre sera plus prononcée, que l'air sera plus calme ou animé d'un mouvement général plus régulier, et que les mouvements de l'air dans le sens vertical seront moins favorisés par la configuration du terrain. »

Hauteur moyenne mensuelle à Paris. — A Paris, la moyenne générale des hauteurs barométriques est de $0^m,755$ en nombre rond.

Voici, pour une année, d'octobre 1873 à septembre 1874, l'excès moyen mensuel des hauteurs du baromètre, à midi, sur la moyenne générale précédente :

1873			1874		
OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.
$-1^{mm},4$	$-1^{mm},9$	$8^{mm},9$	$5^{mm},1$	$2^{mm},7$	$7^{mm},0$

1874					
AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.
$-1^{mm},7$	$-1^{mm},0$	$2^{mm},5$	$1^{mm},1$	$1^{mm},3$	$0^{mm},9$

Variations extrêmes du baromètre en un mois. — D'après les résultats de onze années d'observations, faites à Paris de 1816 à 1826, les maxima des écarts de la colonne barométrique dans l'espace d'un mois sont, pour les douze mois de l'année :

JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE	DÉCEMBRE.
31,5	27,7	27,2	25,0	20,5	15,9	14,5	16,2	17,4	27,0	27,4	28,4

Ainsi l'écart maximum se produit en janvier et l'écart minimum en juillet.

Influence de la lune sur le baromètre. — On a cherché, par des observations suivies, si la lune avait une influence sensible sur les variations de la pression atmosphérique. Si cette influence existe, elle est très-faible et variable avec les pays.

Variations accidentelles du baromètre. — Les variations accidentelles du baromètre sont de la plus haute importance pour la prévision du temps. Nous en parlerons plus loin, lorsque nous traiterons des grands courants atmosphériques.

2° OBSERVATIONS DE LA TEMPÉRATURE. — THERMOMÈTRES.

Principe du thermomètre. — Le volume des corps varie avec la quantité de chaleur qu'ils contiennent; ce volume est même caractéristique de la quantité de chaleur.

Lorsqu'un corps, placé successivement dans deux milieux différents, occupe exactement le même volume, les deux milieux sont à la même température.

La température est l'expression numérique de ce volume.

Un corps, disposé de telle manière que l'on puisse facilement en mesurer les variations de volume, est un thermomètre; il sert à mesurer les températures.

On adopte, pour établir une échelle de comparaison, certains points fixes faciles à retrouver.

Le zéro des thermomètres correspond généralement à la température de la glace fondante ; le zéro indique donc le volume que prend la substance thermométrique lorsqu'on la plonge dans un vase rempli de glace pilée qui fond peu à peu.

Dans l'échelle centigrade, généralement adoptée, le centième degré correspond à la température à laquelle l'eau se met à bouillir, sous une pression atmosphérique de 0m,760 de mercure ; la division 100° mesure donc le volume que prend la substance thermométrique lorsqu'elle est plongée dans un bain de vapeur qui s'échappe d'une masse d'eau en ébullition et qui est protégée soigneusement contre l'action réfrigérante de l'air ambiant.

Dans l'échelle de Réaumur, le point de fusion de la glace est à 0° et le point d'ébullition de l'eau à 80°.

Dans l'échelle anglaise de Fahrenheit, le point de fusion de la glace est à 32° et le point d'ébullition de l'eau à 212°.

Thermomètres divers. — Les liquides ont un coefficient de dilatation plus élevé que celui des solides : ils sont incompressibles ; il est facile, en outre, de mesurer leurs variations de volume. Aussi, ce sont les liquides qui donnent les thermomètres les plus simples.

Le mercure, par sa fixité, par la facilité avec laquelle on l'obtient à l'état pur, par son point d'ébullition élevé, est, de tous les liquides, la meilleure substance thermométrique. Nous avons expliqué, en physique, la construction du thermomètre à mercure et nous ne reviendrons pas sur ce point.

L'alcool, qui se congèle difficilement et qui conserve longtemps sa fluidité, rend de grands services pour la mesure des basses températures. Le thermomètre à alcool se gradue par comparaison avec un thermomètre à mercure. L'échelle des thermomètres doit toujours être gravée sur le verre même.

Thermomètre à maxima de Walferdin. — Le thermomètre à maxima de Walferdin est représenté par la figure 5.

Le sommet du tube capillaire communique avec une ampoule *m* ; à mesure que la température s'élève, le mercure monte dans le tube et finit par se déverser dans l'ampoule ; tant que le déversement continue, la température croît ; elle atteint son maximum lorsque le déversement s'arrête, mais le mercure qui a pénétré dans l'ampoule ne peut revenir dans le tube et, si la température diminue, la colonne thermométrique s'abaisse. L'observateur veut-il reconnaître alors quelle a été la température maxima ? Il plonge le thermomètre dans un bain qu'il échauffe progressivement, le mercure remonte ; au moment où il va se déverser de nouveau, on note la température du bain indiquée par un thermomètre ordinaire ; c'est précisément la température maxima cherchée.

Fig. 5.

Pour faire revenir dans le tube capillaire le mercure qui a passé dans l'ampoule, on renverse l'appareil au moment où on le sort du bain, c'est-à-dire au moment où le mercure est en *a*, sur le point de déborder, et on le laisse refroidir lentement ; la contraction s'opère sans qu'il se forme de solution de continuité dans le métal liquide, et, si l'on pousse le refroidissement assez loin, on fait rentrer dans le tube tout le mercure de l'ampoule. L'appareil est alors disposé pour commencer une nouvelle opération.

Ce thermomètre est un appareil déjà ancien ; on en a établi d'autres plus ou

moins analogues dont le fonctionnement est basé sur le même principe.

Thermomètre à minima de Rutherford. — Le thermomètre à minima est un thermomètre à alcool dans le tube capillaire duquel est un petit cylindre ou index en émail ; cet index ne peut se séparer de l'alcool dans lequel il baigne ; lorsque la colonne liquide se retire, elle l'entraîne donc avec elle, et l'extrémité de l'index la plus éloignée du réservoir indique la limite du recul de la colonne thermométrique ; au contraire, lorsque la température s'élève et que la colonne liquide s'avance dans le tube, elle passe autour de l'index et ne l'entraîne point dans son mouvement.

Ainsi, la position de l'index indique le plus grand mouvement de recul de l'alcool et, par suite, la température minima.

Il va sans dire que l'appareil doit être posé horizontalement et préservé de tout mouvement accidentel.

Lorsqu'une observation est terminée, on place le thermomètre verticalement, le réservoir en haut, et l'index descend au sommet de la colonne alcoolique dans le tube capillaire ; s'il est nécessaire, on facilite la descente par quelques légers chocs.

Installation des thermomètres. — Une station météorologique comporte quatre thermomètres :

1° Un thermomètre ordinaire, donnant la température de l'air ambiant ;

2° Un thermomètre enveloppé d'une mousseline qui est constamment humectée d'eau ; la comparaison de ce second thermomètre avec le premier permet d'apprécier le degré d'humidité de l'air, ainsi que nous le verrons en parlant des hygromètres, et les deux appareils réunis constituent le psychromètre ;

3° Un thermomètre à maxima ;

4° Un thermomètre à minima.

Voici les recommandations que donne M. Marié-Davy au sujet de l'installation des thermomètres :

« La meilleure installation pour les thermomètres est la suivante. Au milieu d'un gazon découvert on plante quatre piquets à 1 mètre les uns des autres, en un carré dont les côtés sont orientés est-ouest et nord-sud et s'élèvent à 2 mètres au moins au-dessus du gazon. Ces piquets sont recouverts d'un premier toit en zinc de 1 mètre de côté, et incliné de 30 degrés environ vers le midi. A 10 centimètres au-dessus de ce premier toit, on en place un second ayant la même inclinaison que le premier et le débordant dans tous les sens de 10 à 12 centimètres. L'air doit pouvoir circuler librement entre ces deux toits. C'est au-dessous de ce double abri, vers son bord septentrional, qu'on installe les thermomètres, de manière que leur réservoir soit au-dessous du bord le plus bas du toit, sans cependant recevoir l'action directe des rayons solaires. Des abris latéraux, placés à distance, doivent les garantir du soleil levant ou couchant. Aucun mur ne doit se trouver à proximité du lieu choisi.

Dans les villes, cette installation n'est pas toujours possible. Dans ce cas, les thermomètres seront placés à 5 ou 6 centimètres les uns des autres, en avant d'une fenêtre, aussi exactement que possible exposée au nord. Cette fenêtre doit appartenir à une pièce non chauffée et avoir devant elle un espace libre d'une assez grande étendue. Aucun mur frappé par les rayons du soleil ne devra se trouver à proximité des thermomètres et le sol environnant sera, s'il se peut, gazonné. De légers abris en planches ou en zinc garantiront les instruments de la pluie, sans gêner les mouvements de l'air.

A chaque lecture, il faut avoir soin de se placer dans une position telle, que la ligne qui va de l'œil à l'extrémité de la colonne ou de l'index soit à très-peu près perpendiculaire au tube du thermomètre observé ; on doit éviter également que la chaleur de l'haleine ou celle de la lumière dont on fait usage au besoin ne faussent les indications des instruments.

Les dixièmes de degré s'évaluent, par estime, à la simple vue. Le vernier du baromètre peut servir à exercer l'œil à cette opération.

Il arrive quelquefois, surtout par les températures élevées, qu'une bulle d'alcool se forme dans le tube thermométrique, par l'effet de la condensation de la vapeur du liquide. Les indications de l'instrument sont alors trop faibles de toute la longueur de la bulle. Cette séparation arrive fréquemment dans le transport de l'instrument. Pour la faire disparaître, il suffit généralement de suspendre l'instrument à une courte ficelle et de le faire tourner en fronde. Le thermomètre à alcool supporte très-bien cette opération à cause de la faible densité du liquide ; elle ne serait pas sans danger pour les thermomètres à mercure.

Si le mouvement de fronde ne suffisait pas, on chaufferait doucement le thermomètre, de manière à porter la colonne à la rencontre de la bulle liquide.

Les thermomètres doivent avoir une excursion en rapport avec les données qu'ils doivent fournir et avec les extrêmes de température qui peuvent se présenter dans chaque station. Ces extrêmes varient beaucoup, suivant les localités. On tiendra compte des données acquises sur le climat du lieu qu'on habite.

Les thermomètres ont besoin d'être comparés aux étalons, particulièrement le thermomètre à alcool ; mais, en dehors de cette comparaison, qui se fait à l'Observatoire de Paris, il est utile de vérifier au moins une fois par an, surtout dans les premières années, la position du zéro, qui se déplace graduellement par l'effet du travail moléculaire du verre du réservoir. Pour faire cette vérification, on pile de la glace fondante et on la place dans un vase cylindrique percé au fond. Avec une baguette, on fait un trou dans la glace, au centre du vase ; on y plonge le thermomètre, on tasse légèrement la glace et on en ajoute, de manière que toute la colonne de mercure en soit couverte. Au bout de vingt ou vingt-cinq minutes, on écarte un peu la glace pour lire à quel degré et fraction de degré s'est arrêtée la colonne de mercure. »

Difficulté d'apprécier la température de l'air. — Les gaz en général et l'air en particulier ont une faible chaleur spécifique. Lorsqu'un thermomètre est plongé dans l'air, il est souvent beaucoup moins affecté par l'air ambiant que par la chaleur rayonnante qu'il reçoit du sol ou des surfaces voisines, telles qu'un bâtiment ou un mur.

« La détermination de la température propre de l'air, dit l'Annuaire météorologique de 1875, est un problème assez complexe et qui exige certaines précautions. Placé dans une enceinte obscure en état d'équilibre, un thermomètre marquera exactement la température de l'enceinte ; mais si, dans les mêmes conditions, la température est croissante ou décroissante, le thermomètre ne suivra que de plus ou moins loin la variation qu'il devrait accuser. L'écart dépendra de la rapidité du changement et aussi du volume, de la forme et de la nature de l'instrument. Si l'enceinte est en outre traversée par des rayons du jour, une nouvelle cause d'erreur viendra s'ajouter à la première. L'air, en effet, est doué d'une grande transparence pour les rayons de chaleur lumineuse émanés du soleil, qui peuvent le traverser sans l'échauffer directement d'une manière sensible. Tous les corps opaques opposés à ces rayons en absor-

bent au contraire une partie notable qui élève leur température au-dessus de celle de l'air ambiant. Dans le jour, tous les thermomètres, même ceux qui sont à l'ombre, ont donc de ce fait une tendance à marquer un degré un peu plus élevé que l'air environnant. Il faut les abriter, mais en ayant égard à cette circonstance que les abris eux-mêmes se trouvent dans le même cas.

Pour obvier à ce double inconvénient, Arago avait conseillé l'emploi d'un thermomètre auquel on imprime un mouvement de fronde assez précipité, ayant pour objet de mettre l'instrument en contact avec une masse d'air rapidement renouvelé; par ce moyen, l'écart, assez marqué dans certaines conditions, qui existe entre la température du thermomètre et la température de l'air, se trouve sensiblement réduit. Le thermomètre-fronde est, en particulier, le seul qui puisse donner la température de l'air en mer, la mobilité des navires n'y permettant pas d'installation fixe. Il doit aussi accompagner le météorologiste dans ses excursions ayant pour objet de comparer les températures de localités diverses, sans installation préalable et permanente, et de contrôler les indications fournies par les thermomètres des stations météorologiques, dont l'installation semblerait défectueuse, afin de déterminer leurs constantes locales. »

Dans les stations bien installées, on dispose les thermomètres comme nous l'avons expliqué au paragraphe précédent.

Différence entre le thermomètre fronde et le thermomètre fixe. — Pendant le jour, le thermomètre-fronde est en avance sur le thermomètre fixe convenablement installé. La différence moyenne a son maximum vers midi, et des observations poursuivies pendant une année (1872-1873) ont donné pour cette moyenne maxima quatorze centièmes de degré.

Inversement, pendant la nuit le thermomètre-fronde est en retard sur le thermomètre fixe. L'excès maximum se produit vers minuit; les observations d'une année ont donné, pour la moyenne de cet excès maximum, cinq centièmes de degré.

Il n'est point douteux, d'après cela, que la différence entre les deux thermomètres ne soit produite par le rayonnement.

Il faut donc chercher à éliminer l'influence du rayonnement; c'est ce qu'on fait en installant les thermomètres sous un abri semblable à celui que nous avons décrit. A Kew (Angleterre), où règnent des vents violents, on entoure les thermomètres de parois verticales, à claire-voie, semblables à des persiennes.

Observations thermométriques à Paris. — La température moyenne d'un lieu et les oscillations de la température autour de sa moyenne sont les principales caractéristiques du climat de ce lieu.

Aussi, les premières observations thermométriques remontent-elles à une époque relativement éloignée :

Les premières observations auxquelles on puisse se fier datent de 1671, et sont dues à J.-D. Cassini. De 1669 à 1754, on consulta un thermomètre à alcool, qui devait être médiocre. Concurremment, on se servit d'un thermomètre de Fahrenheit que la chaleur fit éclater en 1705.

On sait que la température des caves de l'Observatoire est sensiblement constante; le thermomètre de Fahrenheit, dont il est parlé ci-dessus, y fut descendu deux fois pour être vérifié; la première fois, en 1682, il marqua une température de 12°,7 centigrades; la deuxième fois, en 1702, il marqua une température de 12°,6 centigrades.

Divers autres appareils succédèrent au précédent dans le dix-huitième siècle.

Mais les observations régulières, sur lesquelles on peut sérieusement compter, ne datent que de 1804.

Températures les plus élevées connues à Paris. — On trouvera dans l'*Annuaire météorologique* le tableau des plus hautes températures observées chaque année, à Paris, depuis 1699. Si on divise cet espace de temps en périodes de trente années, on arrive aux résultats suivants :

Première période, 1699-1729. — La température la plus chaude a eu lieu en 1720, elle est de 40°. La moyenne des maxima thermométriques annuels de la période est de 30°,6.

Deuxième période, 1730-1758. — Température la plus haute : 37°,7, 14 juillet 1757. Moyenne des maxima thermométriques, 34°.

Troisième période, 1759-1788. — 40°, 26 août 1765; 39°,4, 14 août 1773. Moyenne, la plus élevée des six périodes, 35°,1.

Quatrième période, 1789-1818. — Température la plus haute : 38°,4, 4 juillet 1793. Moyenne des maxima thermométriques annuels, 32°,3.

Cinquième période, 1819-1848. — Température la plus haute : 36°,6, 18 août 1842. Moyenne des maxima thermométriques annuels, 32°,9.

Sixième période, 1849-1872. — Température la plus haute : 36°,2, 4 août 1857. Moyenne des maxima thermométriques annuels, 32°,7.

A Montsouris, le thermomètre s'est élevé à 37°,2 le 8 août 1873, et à 38°,4 le 9 juillet 1874.

Températures les plus basses connues à Paris. — Voici la moyenne des tableaux de l'Observatoire; dans ces tableaux, on conserve les périodes précédentes :

	MOYENNE DES PLUS GRANDS FROIDS DE CHAQUE ANNÉE.	PLUS BASSE TEMPÉRATURE DE LA PÉRIODE.
1re période. . . 1699 — 1728	— 6°,7	— 19°,7 en 1716
2e période. . . 1729 — 1758	— 10°,0	— 16°,5 en 1742
3e période. . . 1759 — 1788	— 11°,2	— 21°,5 en 1788
4e période. . . 1789 — 1818	— 11°,0	— 23°,5 25 janvier 1795
5e période. . . 1819 — 1848	— 10°,4	— 19°,0 janvier 1838
6e période. . . 1849 — 1872	— 9°,4	— 21°,3 9 décembre 1871

« Il résulterait de ces tableaux, dit M. Marié-Davy, que les étés les plus chauds, en moyenne, se seraient présentés vers le milieu et dans la seconde moitié du siècle dernier, et que les hivers les plus froids se seraient étendus sur une période un peu plus rapprochée de nous. Vers le milieu de ce siècle-ci, les hivers auraient été un peu moins froids sans que les étés aient fourni une quantité de chaleur notablement moindre. L'adoucissement des hivers a été compensé pour nous par une sensibilité plus grande résultant du changement apporté dans nos habitudes; et, si les hivers rudes nous reviennent, comme c'est probable, nous serons portés à en exagérer la rigueur. »

Nombre de jours de gelée par hiver. — Le nombre des jours de gelée que comporte chaque hiver varie dans des limites assez étendues :

De 1788 à 1817	la moyenne du nombre des jours de gelée par hiver est.		46,5
1818 à 1847	—	—	47,4
1848 à 1872	—	—	45.7

A part quelques exceptions, le maximum du nombre des jours de gelée correspond aux hivers qui ont fourni la température la plus basse, et le minimum aux hivers dont la température a le moins descendu au-dessous de zéro.

L'hiver 1788-1789, dont la température la plus basse a été de — 21°,5, a présenté 86 jours de gelée de novembre à mars.

L'hiver 1721-1722, dont la température la plus basse a été de — 3°,7, n'a présenté que 10 jours de gelée.

On a relevé aussi les plus grands nombres de jours consécutifs de gelée qui se sont produits à Paris de 1788 à 1874 :

En 1788-1789, il y a eu 58 jours consécutifs de gelée; en 1794-1795, 42 jours; en 1829-1830, 43 jours; depuis 1848, le maximum a été de 25 jours pendant l'hiver 1849-1850.

Dans la période de 1788 à 1818, la moyenne des plus grands nombres de jours consécutifs de gelée par année a été de 14,4; de 1818 à 1848 cette moyenne a été de 16,2, et de 1848 à 1872, 12,3.

Températures moyennes. — On distingue, en un lieu donné, la température moyenne du jour, du mois et de l'année.

Le point de départ est évidemment la température du jour. Pour l'obtenir avec exactitude, il faut observer le thermomètre à des intervalles rapprochés, toutes les heures, par exemple, et faire la moyenne des observations.

On comprend que c'est là une obligation difficile à remplir d'une manière continue; elle est impossible pour un observateur seul, et n'est applicable que dans de grands établissements, ayant une existence indépendante, tels que les écoles.

Fort heureusement, l'expérience a conduit à des résultats qui facilitent beaucoup la besogne :

1° Si l'on fait huit observations par jour : à minuit, trois, six, neuf heures du matin, et à midi, trois, six, neuf heures du soir, on reconnaît que la moyenne de ces huit observations se confond sensiblement avec la moyenne des vingt-quatre observations horaires;

2° Bien plus, si l'on se contente de quatre observations par jour : neuf heures du matin, midi, neuf heures du soir, minuit, on reconnaît que la moyenne de ces quatre observations diffère très-peu de la moyenne des vingt-quatre observations horaires.

La différence maxima pour l'année entière a été constatée à Munich, elle s'élève seulement à 0°,12 : c'est-à-dire qu'on peut n'en pas tenir compte.

A défaut des quatre observations journalières, on peut recourir aux thermomètres à maxima et minima que l'on vérifie toutes les vingt-quatre heures; la moyenne arithmétique du maximum et du minimum est prise pour la température moyenne du jour. Les anciennes observations sont, en général, établies d'après ce principe.

Le desideratum serait d'obtenir un bon thermomètre enregistreur, dont les variations soient indiquées automatiquement sur une feuille de papier, mue par un mouvement d'horlogerie et se déroulant d'un mouvement uniforme; il n'existe pas encore d'appareil de cette sorte sur les résultats duquel on puisse compter.

Voici les températures moyennes mensuelles déduites de soixante années d'observations faites, à Paris, de 1806 à 1870 :

TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES

JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.
2°,4	4°,5	6°,4	10°,1	14°,2	17°,2	18°,9	18°,5	15°,7	11°,3	6°,5	3°,7

Le tableau suivant, extrait de l'*Annuaire météorologique*, donne les températures moyennes, par périodes d'années, de 1734 à 1870 :

TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES.

	1734—40	1806—18	1819—48	1849—72	1806—70
Janvier	3,6	2,1	1,9	3,0	2,0
Février	4,5	4,9	4,0	4,5	4,5
Mars	6,3	6,3	6,6	6,3	6,4
Avril	2,9	9,3	10,2	10,7	10,1
Mai	13,9	14,9	14,2	13,8	14,2
Juin	17,7	16,6	17,4	17,1	17,2
Juillet	19,4	18,5	18,9	19,1	18,9
Août	18,5	17,3	18,7	18,4	18,5
Septembre	16,7	15,4	15,8	15,7	15,7
Octobre	11,0	11,1	11,4	11,3	11,3
Novembre	4,2	6,3	6,9	5,9	6,5
Décembre	3,9	3,4	3,8	3,4	3,7
Moyenne de l'année	10,7	10,5	10,8	10,8	10,8

On doit donc adopter ponr la *température moyenne annuelle* de Paris 10°,7.

On sait que les caves de l'Observatoire de Paris, situées à une profondeur de 29 mètres au-dessous du sol de la cour, conservent une température constante : à cette profondeur, en effet, les variations de la température atmosphérique ne se font pas sentir ; ces variations n'ont d'action que sur la croûte supérieure du sol, ainsi que nous le verrons plus loin. La température constante des caves de l'Observatoire, constatée avec de bons instruments, est de 11°,74. Or, l'expérience nous apprend que la température augmente à mesure que l'on s'enfonce dans la terre et que l'accroissement est d'un degré par 32 mètres de profondeur.

Retranchant un degré de 11°,74, il reste 11°,7 c'est-à-dire précisément la valeur que nous avons trouvée pour la température moyenne de Paris. C'est une vérification intéressante des observations recueillies.

Par la connaissance des températures extrêmes et de la température moyenne d'un pays, on a les caractéristiques principales du climat de ce pays.

Température moyenne en divers points du globe. — Nous venons de voir que la température moyenne de Paris était demeurée sensiblement constante, du moins depuis l'époque où ont commencé les observations régulières du thermomètre. De même, il existe, au point de vue des températures, une année normale, autour de laquelle oscillent les années successives ; le minimum de température se produit vers le 15 janvier, puis la température s'élève, d'abord lentement jusqu'en avril, puis rapidement jusqu'en juin ; le maximum se produit vers la fin de juillet. Le décroissement s'accuse en septembre et se précipite en octobre et novembre.

Ainsi, dans chaque pays, on peut relever la marche générale de la température qui n'est pas toujours d'accord avec la marche des saisons astronomiques, lesquelles ne dépendent que du mouvement apparent du soleil.

La chaleur reçue en chaque lieu du globe dépend évidemment de l'obliquité des rayons du soleil; aussi est-elle plus considérable dans les régions voisines de l'équateur que dans celles qui sont voisines du pôle. Mais la décroissance ne peut être régulière à cause des accidents que présente la surface du globe : les causes locales exercent une influence considérable sur la température moyenne. Ainsi, la nature du sol et de la végétation qui le recouvre ont une action sérieuse : les vents du sud qui traversent le Sahara et la Méditerranée s'échauf-

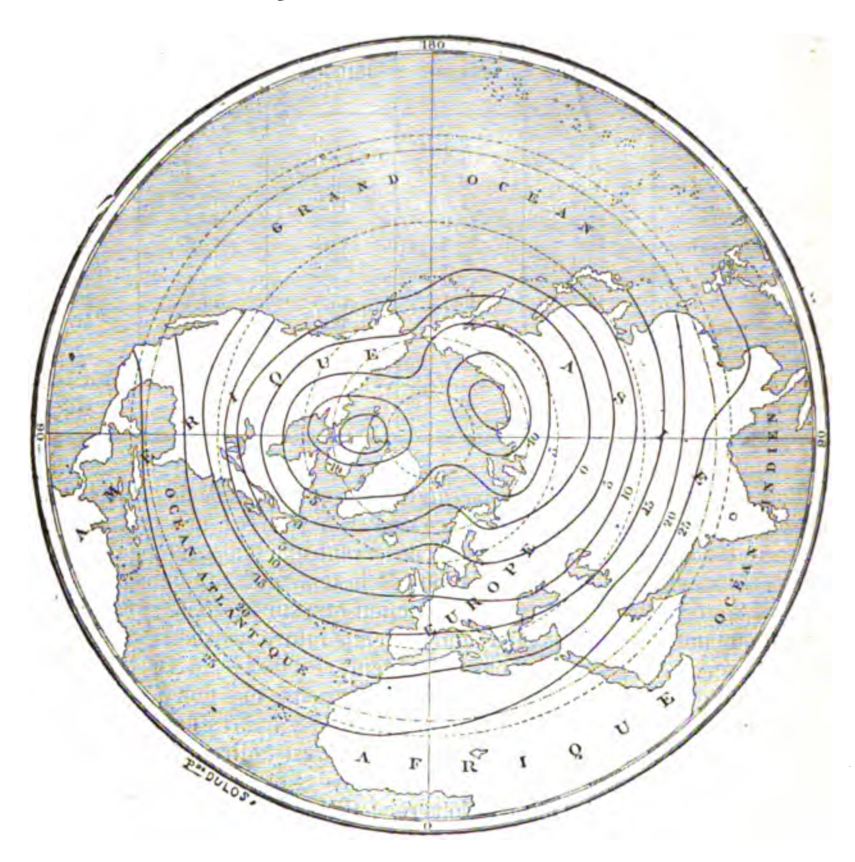


Fig. 6.

fent au contact des sables brûlants du désert et viennent apporter jusqu'à la Provence la chaleur qui les imprègne. Au contact des grandes masses liquides au contraire, ils déterminent une abondante évaporation qui consomme une grande quantité de chaleur.

La direction des vents régnants exerce donc une notable influence sur la température d'un lieu. Il en est de même de la proximité de la mer : les côtes de France ont une température moyenne bien supérieure à celle des steppes de la Russie situés sur le même parallèle ; c'est qu'en hiver le rayonnement du sol

est beaucoup moindre chez nous, à cause des nuages qui obscurcissent le ciel; c'est qu'en outre les grands courants marins apportent à nos rivages la chaleur qu'ils ont prise à l'équateur.

La température d'un lieu dépend aussi de son altitude : l'air laisse passer presque intacts les rayons calorifiques du soleil, il leur est très-perméable et ne s'échauffe guère qu'au contact du sol; plus on s'éloigne de la surface de la terre, moins l'échauffement de l'air est facile et plus la température moyenne s'abaisse.

La figure 6 représente les courbes isothermes (d'égale chaleur) dans l'hémisphère boréal. On reconnaît bien l'irrégularité de ces courbes et on voit comme elles sont déformées par les accidents locaux. Ainsi, considérons la courbe 10 degrés ; elle monte vers le pôle depuis l'Atlantique jusqu'à Londres, dans la direction du grand courant d'eau chaude de l'Atlantique ; de Londres (latitude 51° 31′) elle descend vers l'équateur à mesure qu'elle s'avance dans le continent asiatique ; elle coupe la mer Noire et la mer Caspienne et va jusqu'à la latitude de 40 degrés. Elle reparaît en Amérique, vers l'Orégon, à 46 degrés de latitude et de là descend vers l'équateur jusqu'à la latitude de 41 degrés pour remonter ensuite et rejoindre l'Angleterre.

Ainsi que nous l'avons dit, la température moyenne d'un lieu ne suffit pas pour en caractériser le climat ; il faut connaître encore les variations extrêmes de température. Si ces variations sont faibles, le climat est constant ; sinon il peut être excessif et insupportable pendant certaines saisons de l'année pour les animaux comme pour les végétaux.

On a cherché à construire les courbes isochimènes (d'égale chaleur pendant l'hiver) et isothères (d'égale chaleur pendant l'été); mais les documents dont on dispose ne sont pas encore assez complets pour qu'on puisse tracer ces courbes avec certitude.

Le climat de la France s'est-il modifié ? — C'est un fait admis par beaucoup de personnes que le climat de la France s'est modifié depuis les temps historiques ; cependant il n'y a point de preuve réelle de ce fait.

« Rien n'est fixe dans la nature, dit M. l'ingénieur Cézanne dans son Étude sur les torrents des Hautes-Alpes; tout oscille, la molécule comme l'Océan, mais surtout l'atmosphère que sa mobilité livre à toutes les influences contraires. Par suite, le climat varie avec les heures du jour, avec les mois de l'année et même avec les siècles et les périodes de siècles. Ces variations sont périodiques : ce sont des oscillations, en apparences accidentelles, autour d'une moyenne que l'on peut considérer comme constante, quoiqu'elle-même varie dans la suite des âges. Mais ces deux *modes* du climat, l'*accident variable* et la *moyenne constante* frappent différemment notre esprit : l'idée de variation est vulgaire, elle s'impose à chacun de nous par une expérience personnelle, directe, mille fois répétée, car suivant le proverbe : les jours se suivent et ne se ressemblent pas. Au contraire, la fixité séculaire du climat est une sorte d'abstraction qui exige un effort de la réflexion et qui ne se révèle que par des comparaisons et de patientes recherches dans les archives scientifiques. Ainsi dans le climat, sa variabilité nous frappe et sa constance nous échappe. Vienne alors une série d'années plus chaudes ou plus froides, aussitôt quelque vieillard, *laudator temporis acti*, s'écriera que le climat s'est gâté, qu'autrefois les hivers étaient plus vifs et les étés plus féconds. D'autres répéteront son dire et ainsi s'accréditera peu à peu la croyance à la détérioration du climat. »

Il est impossible de reconnaître la variation du climat, si variation il y a, en

compulsant les observations thermométriques. Car le thermomètre ne remonte guère au-delà de l'an 1600 et il ne faut pas compter sur l'exactitude des appareils employés avant le commencement du siècle actuel. Les différences qu'il s'agit de constater sont très-faibles : la température moyenne de Paris est de 10°,7 et celle de Londres 9°,8 ; cette faible différence suffit pour changer les conditions de l'existence et pour faire disparaître bon nombre de végétaux ; à une différence minime dans la température moyenne peut donc correspondre une variation notable du climat et les observations demandent à être faites avec des instruments exacts et comparables.

Certains auteurs romains citent le climat de la Gaule comme épouvantable et cela se conçoit s'ils le comparaient à leur beau ciel de l'Italie. De son côté, l'empereur Julien célèbre la douceur du climat de sa chère Lutèce. On ne peut donc trouver les éléments de la solution du problème dans les auteurs anciens, qui du reste manquaient de moyens de comparaison.

C'est plutôt dans les variations de la culture qu'on rencontrerait quelques preuves sérieuses : ainsi, la vigne existait autrefois en Normandie et en Bretagne, on ne l'y trouve plus aujourd'hui ; le pommier, paraît-il, tend à disparaître de l'Angleterre. Le climat de la Normandie et du sud de l'Angleterre se serait donc refroidi.

Cependant, la preuve n'est pas convaincante et les variations dans les habitudes et dans le genre de vie ont bien pu entraîner les variations des cultures. Toutefois, il faut reconnaître que, depuis le moyen âge, la température du Groënland s'est considérablement abaissée, et que cette terre, jadis florissante, tend à se couvrir de glaces. Un fait analogue a été constaté en Islande et sur les côtes de Norvége. L'Angleterre et le nord de la France ont pu participer dans une faible mesure à ce refroidissement.

« Une cause scientifique sérieuse a été donnée du refroidissement progressif de notre hémisphère : on l'a attribué à la précession des équinoxes. Ce phénomène résulte de la forme aplatie de la terre : si l'on décrit une sphère sur la ligne des pôles comme diamètre, il reste en dehors de cette sphère deux renflements dont l'épaisseur, nulle aux pôles, est maxima à l'équateur ; le soleil exerce sur ces deux renflements une action inégale et tend à faire tourner la terre sur un axe situé dans le plan de l'écliptique ; cette rotation se compose avec la rotation de la terre autour de la ligne des pôles et il en résulte un déplacement incessant de cette ligne des pôles qui décrit un cône droit autour de l'axe de l'écliptique. La période de l'oscillation est de 21,000 ans. L'été de l'hémisphère boréal, c'est-à-dire l'intervalle compris entre les deux équinoxes, est plus long de huit jours environ que l'été de l'hémisphère austral ; mais la différence entre les deux étés n'est pas constante, elle a eu son maximum en 1248 et diminue depuis lors ; notre hémisphère se refroidit donc et l'hémisphère austral s'échauffe. C'est ce qui expliquerait la conversion du Groënland en glacier et la disparition progressive des glaces du pôle austral.

Voilà la seule cause réelle que l'on puisse invoquer du refroidissement de nos pays ; ce refroidissement paraît démontré non-seulement par les variations de culture indiquées plus haut, mais encore par l'extension qu'auraient prise certains glaciers des Alpes depuis les temps historiques.

Influence du déboisement sur la température. — On a prétendu que le déboisement était la cause du refroidissement de nos pays, et le savant Arago a soutenu cette thèse.

Elle ne paraît pas fondée, car le refroidissement, s'il est réel, ne remonterait

qu'au moyen âge, et les déboisements opérés depuis cette époque n'ont pas dû changer notablement la configuration générale du pays. Les observations thermométriques recueillies de 1771 à 1834 aux États-Unis et discutées par de Humboldt, n'accusent aucune modification de climat, et cependant les États de Pensylvanie et de Virginie ont été, dans cet intervalle, déboisés et défrichés à outrance.

Le déboisement n'a certes pas été la cause du refroidissement du Groënland et de l'Islande. « Nous sommes disposé à admettre, dit M. Cézanne, que la température, à la surface du globe, peut varier avec les révolutions astronomiques ; mais que, ni la charrue du laboureur, ni la cognée du bûcheron, qui égratignent à peine l'épiderme de notre planète, n'exercent sur la température de l'atmosphère une action sensible. »

Le déboisement peut avoir une influence locale très-sensible sur le climat d'un lieu déterminé : abattez une forêt sur une côte de l'Océan exposée à l'ouest, elle n'arrêtera plus les vents chauds venant du large, et le climat du pays qu'elle abritait se réchauffera ; au contraire, abattez cette forêt sur une partie plane de notre frontière de l'est, elle n'arrêtera plus les vents secs du nord-est et le climat deviendra plus dur. Une simple haie protége, en Provence, contre le mistral une large bande de terrain, de même qu'un espalier bien abrité des vents froids donne des fruits qui ne viendront pas en plein vent.

Le déboisement peut donc exercer sur le climat une influence locale très-sérieuse ; on ne saurait reconnaître en lui une cause générale de refroidissement.

Température de l'air à la surface du sol. — Afin d'obtenir des observations thermométriques comparables, on doit les faire à des hauteurs suffisantes au-dessus du sol pour que la constitution physique de ce dernier n'ait sur elles aucune influence.

Aussi avons-nous dit qu'on installait les thermomètres sous un abri exposé au nord et à 2 mètres au-dessus du sol.

Les nombres obtenus ainsi représentent bien la température propre de l'atmosphère au lieu considéré ; mais, si l'on descend à la surface même du sol, malgré la faible hauteur de 2 mètres, la température subit des variations souvent considérables. Ce sont ces variations qui affectent les plantes ; elles dépendent essentiellement de la nature du sol et de son degré d'humidité et de la nature de la végétation qui le recouvre.

Pour étudier ces diverses influences, on observe, concurremment avec le thermomètre sous l'abri, des thermomètres placés sur une surface gazonnée, maintenue autant que possible dans un état constant.

« Les minima, dit M. Marié-Davy, sont beaucoup plus bas à la surface du gazon qu'à la hauteur de 2 mètres sous l'abri. En 1874, l'écart s'est élevé à 5°,1 en mars, et, tandis qu'en mai le thermomètre à minima de l'abri n'est descendu qu'une fois et seulement de 0°,1 au-dessous de la glace fondante, le thermomètre du gazon est descendu douze fois au-dessous de ce point : le 18 mai, il marquait encore 2°. Nous retrouvons là les gelées que le thermomètre à l'abri n'accuse pas, mais qui endommagent les récoltes. Des thermomètres semblables, placés en divers points d'un même canton, donneraient à une même époque des résultats très-différents les uns des autres par le seul fait du changement de conditions toutes locales ; on sait, en effet, combien les gelées printanières sont en apparence capricieusement réparties à la surface du même canton.

Les maxima sur le gazon sont, au contraire, beaucoup plus forts que sous l'abri, et l'écart s'est élevé à 12°,8 en juin. »

Température à l'intérieur du sol. — On sait que la température augmente à mesure que l'on s'enfonce dans le sol ; tous ceux qui ont descendu dans une mine ont pu le vérifier.

L'augmentation serait d'un degré centigrade par 32 mètres de profondeur ; de sorte que, si la progression continuait, l'eau serait réduite en vapeur à 3,200 mètres, et l'on trouverait le fer fondu à 48 kilomètres. On ne peut vérifier la loi de progression, qui probablement n'est pas exacte ; car les pressions énormes qu'exercent les masses superposées doivent modifier profondément les propriétés physiques des substances.

Sans nous arrêter à ces considérations, nous ferons remarquer que les variations de température à la superficie de la terre ne se font sentir qu'à une faible profondeur ; nous avons déjà dit que la température des caves de l'Observatoire était sensiblement constante. Tout le monde sait que les caves souterraines sont chaudes en hiver, froides en été, comme les eaux de source qui s'échappent des profondeurs du sol : l'impression de la chaleur ou du froid est, en effet, chose relative ; les caves sont chaudes en hiver parce que leur température est supérieure à celle de l'atmosphère, et froides en été parce que leur température est inférieure à celle de l'atmosphère. Cela veut dire que la température des caves s'écarte peu de la moyenne.

Ainsi, il est constant, d'après la simple observation journalière, que les variations de la température à la surface du sol ne se font pas sentir profondément. On comprend qu'il est intéressant pour l'agriculture et pour les travaux hydrauliques de rechercher les lois de la propagation de la chaleur dans le sol, et de savoir, par exemple, à quelle profondeur il faut se placer pour être à l'abri de la gelée.

L'Observatoire de Montsouris nous a donné, dans l'Annuaire météorologique de 1875, le résultat de ses expériences sur ce sujet.

A côté du thermomètre couché sur le gazon, on a placé cinq thermomètres à mercure plongeant dans le sol aux profondeurs 0m,02, 0m,10, 0m,20, 0m,30 et 1 mètre, et voici les températures moyennes mensuelles qui ont été observées pendant l'année 1873-1874 :

TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES DU SOL GAZONNÉ AU SOLEIL

MOIS DE L'ANNÉE 1873-1874.	SURFACE DU SOL.	A UNE PROFONDEUR DE				
		0m,02	0m,10	0m,20	0m,30	1m,00
Octobre	11,9	10,7	11,6	11,9	12,2	14,3
Novembre	7,3	6,5	7,0	7,1	7,2	9,7
Décembre	2,6	3,2	3,8	4,1	4,3	7,1
Janvier	4,9	3,9	4,3	4,2	4,2	5,9
Février	5,5	3,4	3,7	3,7	3,7	5,5
Mars	9,1	6,2	6,5	6,3	6,2	6,5
Avril	15,5	10,7	11,1	10,8	10,6	9,7
Mai	17,2	11,8	12,3	12,1	12,1	11,7
Juin	23,4	17,7	18,2	18,1	18,0	16,2
Juillet	24,9	21,2	»	»	21,2	18,9
Août	21,3	18,0	18,4	19,0	18,8	18,4
Septembre	20,0	16,3	16,7	17,3	17,1	17,3

On a étudié, pendant le mois de juin 1874, les variations diurnes des températures aux diverses profondeurs précédentes dans le sol gazonné.

Le thermomètre situé à 0m,02 de profondeur marquait son minimum 15°,60 à cinq heures du matin, atteignait son maximum à trois heures de l'après-midi, 19°,88, et décroissait jusqu'au matin.

Pour les thermomètres situés à. .	0m,10	0m,20	0m,30	et	1m,00 de profondeur,
Les minima se produisaient à. . .	6 heures	9 heures	midi	et	5 heures du matin.
Ils étaient de	16°,85	17°,19	17°,70	et	16°,17.
Les maxima se produisaient. . . .	6 heures	8 heures	11 heures	et	5 heures du soir.
Ils étaient de.	19°,56	18°,72	18°,33	et	16°,26.

Ainsi, à 0m,10 de profondeur l'amplitude des variations de température était de 2°,71
0m,20 — — 1°,53
0m,30 — — 0°,63
1m,00 — — 0°,09

A l'ombre de l'abri, la fluctuation des températures moyennes diurnes pendant le mois de juin 1874 était de 10°,97 ; le minimum, vers 4 heures du matin était de 14°,92 et le maximum de 25°,89.

On voit combien la variation de température se fait peu sentir, même à une profondeur de quelques centimètres dans le sol ; elle affecte très-peu la région où pénètrent les racines des plantes.

A 0m,30 de profondeur, les oscillations de température sont déjà peu sensibles, et à 1 mètre elles ne se font pour ainsi dire pas sentir.

« Pendant les grands froids de décembre 1875, dit M. Marié-Davy, alors que le thermomètre couché à la surface du sol marquait — 9°,6, le thermomètre placé à 0m,10 ne descendait pas au-dessous de + 0°,5. Il faut des froids très-intenses et surtout très-prolongés pour que la gelée descende à 0m,20 ou 0m,30, et encore une couche de neige de quelques centimètres d'épaisseur suffit-elle à enrayer ce mouvement d'approfondissement de la gelée. »

3° MESURE DU DEGRÉ D'HUMIDITÉ. — HYGROMÈTRES.

Le degré d'humidité de l'air est un élément aussi caractéristique de l'état atmosphérique que peuvent l'être la pression et la température. Les instruments qui servent à apprécier et à mesurer ce degré d'humidité sont les hygromètres.

Les indications de l'hygromètre sont moins faciles à suivre que celles du baromètre ; aussi sont-elles moins répandues. Cependant elles sont précieuses et il se produit, paraît-il, dans le centre de l'Amérique des coups de vent qui sont précédés de variations hygrométriques, tandis qu'ils n'influent pas sur le baromètre.

Tout le monde connaît les hygromètres vulgaires, construits au moyen de certaines substances animales très-sensibles aux variations de l'humidité, telles que les tendons, les cheveux, les cordes à boyaux ; on a profité des variations de longueur de ces matières animales, pour fabriquer des appareils plus ou moins ingénieux, tels que le capucin qui se couvre ou se découvre suivant que l'air devient plus humide ou plus sec.

Tension maxima de la vapeur d'eau. — On sait que l'atmosphère par sa pression s'oppose à une vaporisation abondante de l'eau. Mais, lorsque l'on fait passer quelques gouttes d'eau dans la chambre supérieure du baromètre où existe un vide parfait, il y a production immédiate de vapeur et dépression de la colonne atmosphérique. On dit que la vapeur est saturée lorsqu'il reste toujours un peu de liquide au-dessus du mercure ; dans ce cas, si l'on enfonce le tube, c'est-à-dire si on diminue la capacité de la chambre vide, il y a une certaine quantité de vapeur qui revient à l'état liquide ; inversement si l'on élève le tube c'est-à-dire si on augmente la capacité de la chambre vide, il y a une certaine quantité de liquide qui passe progressivement à l'état de vapeur.

Pour une température donnée, la dépression de la colonne barométrique reste toujours la même, quel que soit le volume de vapeur, pourvu qu'il y ait toujours de l'eau liquide au-dessus du mercure.

Ainsi, à une température fixe, la tension de la vapeur saturée est constante.

C'est ce qu'on appelle la tension maxima de la vapeur d'eau à cette température ; cette tension maxima ou force élastique augmente avec la température. — Les forces élastiques s'expriment comme la pression atmosphérique en millimètres de mercure.

TABLEAU DES FORCES ÉLASTIQUES DE LA VAPEUR D'EAU

TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.	TEMPÉRATURE.	TENSION.
degrés	mill.	degrés	mill.	degrés	mill.
— 32	0,32	10	9,17	50	91,98
— 25	0,60	15	12,70	60	148,19
— 15	1,40	20	17,39	70	233,02
— 5	3,11	30	31,55	80	354,64
— 0	4,60	40	54,91	100	524,45

Ainsi à 0° la force élastique de la vapeur d'eau saturée fait équilibre à une colonne de mercure de 4 millimètres 6 dixièmes de hauteur.

Etat hygrométrique de l'air. — Dans l'air il y a toujours de la vapeur d'eau, mais la quantité en est très-variable avec les vents et la température. La quantité de vapeur augmente lorsque soufflent les vents qui ont passé sur de grandes étendues de mer ; elle augmente aussi avec la température puisque l'évaporation est plus active.

Mais il est rare que l'atmosphère soit saturée ; généralement la tension f de la vapeur d'eau qu'elle contient est inférieure à la force élastique maxima F, qui convient à la température considérée.

L'état hygrométrique de l'air se mesure par le rapport $\left(\frac{f}{F}\right)$ ou fraction de saturation, que l'on désigne fréquemment par la lettre e.

Poids de vapeur d'eau contenu dans l'air. — Lorsque l'on connaît l'état hygrométrique e, il est facile de trouver la force élastique f de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, puisqu'elle est égale à (e F) ; la tension maxima F est inscrite dans les tables en regard de la température.

La densité de la vapeur d'eau est 0,622, c'est-à-dire que son poids est égal

à la fraction 0,622 du poids d'un égal volume d'air pris à la même température et à la même pression.

A 0° et sous la pression 760, le litre d'air pèse. . . . . . $1^{gr},293$
— et le litre de vapeur d'eau.. . $0,622 \times 1,293$

Le poids varie proportionnellement à la pression et en raison inverse du binôme de dilatation $(1 + \alpha t)$; de sorte qu'à la température t et à la pression f, le poids de vapeur d'eau contenu dans un litre d'air sera donné par la formule

$$0,622 . 1,293 . \frac{f}{760} . \frac{1}{1+\alpha t}$$

dans laquelle le coefficient de dilatation α est égal à la fraction $\frac{1}{273}$.

Exemple : Quel est le poids d'eau contenu dans un litre d'air à la température de 20° avec un état hygrométrique de 0,6 ?

Nous savons que la tension maxima de la vapeur d'eau, à 20°, est de $17^{mm},39$, la tension réelle est égale aux six dixièmes de la précédente, c'est-à-dire à environ dix millimètres. — Nous ferons donc $f = 10$ et la formule nous donnera pour le poids de la vapeur d'eau contenue dans le litre d'air $0^{gr},0096$, ce qui fait $9^{gr},6$ par mètre cube.

Supposez maintenant que la température de l'atmosphère se refroidisse brusquement et tombe à 0°, ce qui arrivera si la masse d'air vient à rencontrer un glacier, une montagne élevée, la tension maxima de la vapeur d'eau s'abaissera à $4^{mm},6$; un mètre cube d'air, en admettant qu'il demeure saturé, ne pourra plus contenir que $5^{gr},4$ de vapeur d'eau et en abandonnera par conséquent, sous forme de pluie, $4^{gr},2$.

Ainsi tout abaissement brusque de température entraîne une augmentation de l'état hygrométrique ; le point de saturation se trouve même souvent dépassé et l'excès d'humidité se résout en pluie.

De même toute compression exercée sur la masse gazeuse a pour effet d'augmenter la pression f de la vapeur d'eau dans le rapport inverse des volumes avant et après la compression ; il en résulte que, par l'effet de la compression, la force élastique f se rapproche de la force élastique maxima F et peut même la dépasser, auquel cas l'air abandonne sous forme de pluie une partie de l'humidité qu'il renferme.

Lorsque des vents violents et chargés d'humidité viennent se briser contre les parois inclinées des montagnes, leur force vive se transforme en compression et ils produisent sur le versant qu'ils frappent des pluies considérables.

On voit, par ces quelques mots, combien les considérations théoriques de l'hygrométrie peuvent être utiles dans l'étude de la répartition des pluies.

Hygromètre à cheveu. — L'hygromètre de Saussure, ou hygromètre à cheveu, n'est guère répandu ; cependant, il serait à désirer qu'on trouvât un appareil d'une observation aussi facile. Malheureusement, il est peu exact et les divers hygromètres ne donnent point des résultats comparables.

En absorbant l'humidité de l'atmosphère, les cheveux s'allongent.

Un cheveu A, fixé verticalement à une vis P, vient s'enrouler sur la poulie P' et se termine en bas par un petit poids B qui fait office de tendeur ; suivant que le cheveu s'allonge ou se raccourcit, la poulie P tourne dans un sens ou dans l'autre ; à ce mouvement de rotation participe l'aiguille I, qui parcourt un arc gradué de 0 à 100.

Le point 0, qui correspond à la sécheresse absolue, s'obtient en laissant séjourner l'appareil sous une cloche en verre dont l'air est desséché par des morceaux de chaux vive.

Le point 100, qui correspond à la saturation complète, s'obtient en plaçant l'appareil sous une cloche dont les parois sont bien imbibées d'eau.

L'intervalle entre les deux points se divise en cent parties égales; mais la proportionnalité des nombres de degrés n'entraîne point celle des états hygrométriques. Ainsi, au degré 25 ne correspond pas l'état hygrométrique 0, 25.

De sorte que, pour chaque appareil, il faudrait construire par expérience directe une table donnant la concordance entre les degrés observés et les états hygrométriques réels.

Bien que les hygromètres à cheveu ne soient pas comparables, on peut admettre, d'après les expériences de Gay-Lussac, qu'aux divers degrés de l'appareil correspondent les états hygrométriques ci-après :

Fig. 7.

DEGRÉS DE L'APPAREIL.	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES.	DEGRÉS DE L'APPAREIL.	ÉTATS HYGROMÉTRIQUES.
0	0	55	0,32
5	0,02	60	0,36
10	0,05	65	0,41
15	0,07	70	0,47
20	0,09	75	0,54
25	0,12	80	0,61
30	0,15	85	0,70
35	0,18	90	0,79
40	0,21	95	0,89
45	0,24	100	1,00
50	0,28		

Le cheveu avec lequel on construit un hygromètre doit être, au préalable, debarrassé des matières grasses qui l'imprègnent et qui s'opposeraient à l'absorption de l'humidité; à cet effet, on le plonge pendant plusieurs heures dans l'éther sulfurique.

Psychromètre. — Le seul appareil dont on se serve actuellement dans les observations météorologiques, pour l'appréciation de l'humidité de l'air, est le psychromètre.

Le psychromètre, ainsi que nous l'avons déjà dit, résulte de la combinaison de deux thermomètres; l'un, exposé à l'air libre et donnant la température de l'atmosphère ambiante, l'autre enveloppé d'une mousseline toujours humectée d'eau.

Lorsqu'on observe ce dernier thermomètre, on reconnaît qu'il marque une température inférieure à celle du thermomètre libre; en effet, l'eau qui humecte la mousseline, s'évapore sans cesse et, à un moment donné, l'évaporation est d'autant plus active que la température est plus élevée et l'atmosphère ambiante plus éloignée de son point de saturation.

En appelant *e* l'état hygrométrique cherché, H la pression atmosphérique au lieu considéré, *t* et T les températures du thermomètre mouillé et du ther-

momètre libre, f et F les tensions maxima de la vapeur d'eau aux températures t et T, les expériences de Dalton et de Regnault conduisent à la formule

$$e = 100 . \frac{f - k.\text{H}(\text{T} - t)}{\text{F}}$$

dans laquelle k est un coefficient numérique.

C'est à l'aide de cette formule empirique qu'ont été calculées les tables psychrométriques de la page 34 dont l'usage est bien facile :

Exemple : Le thermomètre mouillé marque 12°,5 et le thermomètre libre 18°, leur différence est de 5°,5 et la table indique un état hygrométrique qui est la moyenne arithmétique entre 49,5 et 48. On peut donc adopter pour cet état hygrométrique le nombre 49. D'autre part, la tension maxima de la vapeur d'eau à la température de 18° est de 15mm,7; il en résulte que la tension effective de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère au moment considéré est mesurée par 0,49.15,7.
c'est-à-dire par une hauteur de mercure de 7mm,7.

Il ne faut pas oublier que la table psychrométrique suppose que la pression atmosphérique moyenne du lieu s'écarte peu de 760.

Installation des psychromètres. — L'amiral Fitzroy, dans les *Meteorological papers*, présente au sujet du psychromètre les observations suivantes :

« Les deux thermomètres doivent être placés à l'ombre, à l'abri des courants d'air, l'un près de l'autre, sans qu'ils soient cependant à une distance moindre que 50 à 75 millimètres. Leurs boules doivent être complétement dégagées et, autant que possible, à l'abri de tout rayonnement.

« Le thermomètre à boule sèche doit être à l'abri de la pluie, il ne doit être ni au-dessus, ni près du vase contenant l'eau destinée à mouiller la boule du second thermomètre.

« Un petit morceau de toile, de cotonnade ou de mousseline, légèrement attaché autour de la boule du thermomètre, plonge dans l'eau, qui doit être de l'eau douce ou salée à la température de l'atmosphère (l'eau douce est préférable parce qu'elle ne laisse pas déposer de matières solides dans le vase). Toute observation faite lorsque l'eau est plus chaude ou plus froide que l'air ambiant est mauvaise. Il faut donc remplir le vase après l'observation ou quelque temps avant.

« L'observation de cette température d'évaporation ayant un but spécial, les deux thermomètres doivent être dans un air calme. Tout courant d'air accélère l'evaporation et produit, plus ou moins rapidement, un abaissement de température très-variable. L'idée d'agiter le thermomètre à boule mouillée ne vaut rien.

« La mousseline doit être mouillée fréquemment (une ou deux fois par semaine) en jetant de l'eau dessus et changée quelquefois.

« Dans nos climats les écarts des deux thermomètres varient ordinairement de 2 à 6 degrés. Entre les climats chauds et secs et les climats humides on trouve des différences qui vont jusqu'à 17 degrés.

« Quand la température de l'air est comprise entre 0° et 27°, on a approximativement le point de rosée en retranchant de l'indication du thermomètre à boule mouillée la différence des deux thermomètres.

« Quand le thermomètre à boule mouillée est couvert de glace, il ne donne plus de bonnes indications ; bien que l'évaporation continue et puisse être no-

TABLE PSYCHROMÉTRIQUE.

Différence entre les thermomètres sec et mouillé.	TEMPÉRATURE DU THERMOMÈTRE MOUILLÉ, AU-DESSUS DE ZÉRO.														
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
0,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,2	96	96	96	97	97	97	97	97	97	97	97	97	98	98	98
0,4	92	93	93	93	93	94	94	94	94	95	95	95	95	95	95
0,6	88	89	89	90	90	91	91	91	92	92	93	93	93	93	93
0,8	85	85	86	87	87	88	88	89	89	89	90	90	90	91	91
1,0	81	82	83	83	84	85	85	86	86	86	86	87	88	89	89
1,2	78	79	80	80	81	82	83	83	84	84	85	86	85	86	87
1,4	74	75	76	77	78	79	80	81	71	82	83	83	84	84	85
1,6	71	72	73	74	75	77	77	78	79	80	80	81	82	82	83
1,8	67	69	70	71	73	74	75	76	76	77	78	79	80	80	81
2,0	64	66	67	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	78	79
2,2	61	63	65	66	67	69	70	71	72	73	74	75	76	76	77
2,4	58	60	62	63	65	66	67	69	70	71	72	73	74	75	75
2,6	55	57	59	61	62	64	65	66	68	69	70	71	72	73	73
2,8	52	54	56	58	60	61	63	64	65	67	68	69	70	71	72
3,0	50	52	54	56	57	59	61	62	63	65	66	67	68	69	70
3,2	47	49	51	53	55	57	58	60	61	63	64	65	66	67	68
3,4	44	47	49	51	53	55	56	58	59	61	62	63	64	66	67
3,6	41	44	46	49	51	52	54	56	57	59	60	61	62	64	65
3,8	39	42	44	46	48	50	52	54	56	57	58	60	61	63	63
4,0	36	39	42	44	46	48	50	52	54	55	57	58	59	61	62
4,2	34	37	39	42	44	41	48	50	52	53	55	56	58	59	60
4,4	32	35	37	40	42	44	46	48	50	52	53	55	56	57	58
4,6	29	32	35	38	40	42	44	46	48	50	52	53	55	56	57
4,8	27	30	33	36	38	40	43	45	47	48	50	52	53	55	56
5,0	25	28	31	34	36	39	41	43	45	47	48	50	52	53	54
5,2	23	26	29	32	34	37	39	41	43	45	47	49	50	51	53
5,4	21	24	27	30	33	35	37	40	42	44	46	47	49	50	51
5,6	19	22	25	28	31	33	36	38	40	42	44	46	47	49	50
5,8	17	20	23	26	29	32	34	36	39	41	42	44	46	47	49
6,0	15	18	22	25	28	30	33	35	37	39	41	43	44	46	47
6,2	13	16	20	23	26	28	31	33	35	38	40	41	43	45	46
6,4	11	15	18	21	24	27	29	32	34	36	38	40	42	43	45
6,6	9	13	16	19	23	25	28	30	33	35	37	39	41	42	44
6,8	8	11	15	18	21	24	26	29	31	33	35	37	39	41	43
7,0	6	10	13	16	19	22	25	28	30	32	34	36	38	40	41
7,2	4	8	12	15	18	21	24	26	29	31	33	35	37	39	40

Différence entre les thermomètres sec et mouillé.	TEMPÉRATURE DU THERMOMÈTRE MOUILLÉ, AU-DESSUS DE ZÉRO.															
	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°	24°	25°	26°	27°	28°	29°	30°
0,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,2	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
0,4	96	96	96	96	96	96	96	96	96	97	97	97	97	97	97	97
0,6	93	94	94	94	94	94	94	95	95	95	96	95	95	95	95	95
0,8	91	92	92	92	92	92	92	93	93	93	93	93	93	93	94	94
1,0	89	90	90	90	91	91	91	91	91	92	92	92	92	92	92	93
1,2	87	88	88	88	89	89	89	90	90	90	90	90	91	91	91	91
1,4	85	86	86	87	87	87	88	88	88	88	89	89	89	89	90	90
1,6	83	84	84	85	85	86	86	86	87	87	87	87	88	88	88	89
1,8	81	82	83	83	83	84	84	85	85	85	86	86	86	87	87	87
2,0	80	80	81	81	82	82	83	83	83	84	84	85	85	85	85	86
2,2	78	78	79	87	80	81	82	82	82	82	84	83	83	84	84	84
2,4	76	77	77	78	79	79	80	80	80	81	81	82	82	83	83	83
2,6	74	75	76	76	77	77	78	79	79	79	80	80	81	81	81	82
2,8	72	73	74	75	75	76	77	77	78	78	79	79	79	80	80	81
3,0	71	72	72	73	74	74	75	76	76	77	77	78	78	79	79	79
3,2	69	70	71	72	72	73	74	74	75	75	76	77	77	77	77	78
3,4	67	68	69	70	71	72	72	73	73	74	75	75	76	76	76	77
3,6	66	67	68	69	69	70	71	71	72	73	73	74	74	75	75	76
3,8	64	65	67	67	68	69	69	70	71	71	72	73	73	74	75	75
4,0	63	64	65	66	66	67	68	69	69	70	70	71	72	72	73	73
4,2	61	62	63	64	65	66	67	67	68	69	70	70	71	71	72	72
4,4	60	61	62	63	64	65	65	66	67	68	68	69	70	70	71	71
4,6	58	59	61	62	62	63	64	65	66	67	67	68	68	69	70	70
4,8	57	58	59	60	61	62	63	64	65	65	66	67	67	68	68	69
5,0	55	57	58	59	60	61	62	63	63	64	65	65	66	67	67	68
5,2	54	55	56	58	59	60	60	61	62	63	64	64	65	66	66	
5,4	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	63	64	65	65	
5,6	51	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	62	63	64	64	
5,8	50	51	53	54	55	56	57	58	59	60	60	61	62	63	63	
6,0	49	50	52	53	54	55	56	57	58	59	59	60	61	62	62	
6,2	48	49	50	51	53	54	55	56	57	58	58	59	60	61		
6,4	46	48	49	50	51	53	54	55	56	56	57	58	59	60		
6,6	45	47	48	49	50	52	53	54	55	55	56	57	58	59		
6,8	44	45	47	48	49	50	52	53	54	54	55	56	57	58		
7,0	43	44	46	47	48	49	51	52	53	53	54	55	56	57		
7,2	42	43	45	46	47	48	50	51	52	52	53	54	55			

TABLE PSYCHROMÉTRIQUE

Différence entre les thermomètres sec et mouillé	TEMPÉRATURE DU THERMOMÈTRE MOUILLÉ, AU-DESSUS DE ZÉRO.														
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
7,2	4	8	12	15	18	21	24	26	29	31	33	35	37	39	40
7,4	3	7	10	13	16	19	23	25	27	30	32	34	36	37	39
7,6	1	5	9	12	15	18	21	24	26	28	30	32	34	36	38
7,8		4	7	11	14	17	20	22	25	27	29	31	33	35	37
8,0		2	6	9	13	16	18	21	24	26	28	30	32	34	36
8,2		1	4	8	11	14	17	20	22	25	27	29	31	33	35
8,4			3	7	10	13	16	19	21	24	26	28	30	32	34
8,6			2	5	9	12	15	17	20	23	25	27	29	31	33
8,8			1	4	8	11	14	16	19	21	24	26	28	30	32
9,0				3	6	10	13	15	18	20	23	25	27	29	31
9,2				2	5	8	12	14	17	19	22	24	26	28	30
9,4				1	4	7	10	13	16	18	21	23	25	27	29
9,6					3	6	9	12	15	17	20	22	24	26	28
9,8					2	5	8	11	14	16	19	21	23	25	27
10,0					1	4	7	10	13	16	18	20	22	23	26
10,2						3	6	9	12	15	17	19	22	24	25
10,4						2	5	8	11	14	16	18	21	23	25
10,6						1	5	7	10	13	15	18	20	22	24
10,8							4	7	9	12	14	17	19	21	23
11,0							3	6	9	11	14	16	18	20	22
11,2							2	5	8	10	13	13	17	19	21
11,4							1	4	7	10	12	14	17	19	21
11,6								3	6	9	11	14	16	18	20
11,8								2	5	8	11	13	13	17	19
12,0								2	5	7	10	12	14	16	18
12,2								1	4	7	9	11	14	16	18
12,4									3	6	8	11	13	15	17
12,6									2	5	8	10	12	14	16
12,8									2	4	7	9	12	14	16
13,0									1	4	6	9	11	13	15
13,2										3	6	8	10	12	14
13,4										2	5	7	10	12	14
13,6										2	4	7	9	11	13
13,8										1	4	6	8	11	13
14,0										1	3	6	8	10	12

Différence entre les thermomètres sec et mouillé	TEMPÉRATURE DU THERMOMÈTRE MOUILLÉ, AU-DESSUS DE ZÉRO.												
	15°	16°	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°	24°	25°	26°	27°
7,2	42	43	45	46	47	48	50	51	52	52	53	54	55
7,4	41	42	44	45	46	47	49	50	51	52	52	53	54
7,6	40	41	43	44	45	46	48	49	50	51	52	52	54
7,8	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50	51	51	52
8,0	37	39	40	42	43	44	46	47	49	49	50	51	51
8,2	36	38	39	41	42	43	45	46	47	48	49	50	
8,4	35	37	39	40	41	43	44	45	46	47	48	49	
8,6	34	36	38	39	40	42	43	44	45	46	47	48	
8,8	33	35	37	38	39	41	42	43	44	45	46	47	
9,0	33	34	36	37	39	40	41	42	43	44	45	46	
9,2	32	33	35	36	38	39	40	41	42	44	45		
9,4	31	32	34	35	37	38	40	41	42	43	44		
9,6	30	31	35	35	36	37	39	40	41	42	43		
9,8	29	31	32	34	35	36	38	39	40	41	42		
10,0	28	30	31	33	34	36	37	38	39	40	42		
10,2	27	29	31	32	35	35	36	37	39	38			
10,4	23	28	30	31	33	34	35	37	38	38			
10,6	26	27	29	30	32	33	35	36	37	37			
10,8	25	27	28	29	31	33	34	25	36	37			
11,0	24	26	27	29	30	32	33	34	36	36			
11,2	23	25	27	28	30	31	32	34	35				
11,4	22	24	26	27	29	30	32	33	34				
11,6	22	23	25	27	28	30	31	32	34				
11,8	21	22	24	26	28	29	30	32	33				
12,0	20	22	24	25	27	28	30	31	32				
12,2	20	21	23	25	26	28	29	30					
12,4	19	21	22	24	26	27	28	30					
12,6	18	20	22	23	25	26	28	29					
12,8	18	19	21	23	25	23	27	28					
43,0	17	19	21	22	24	25	27	28					
13,2	16	18	20	22	23	25	26						
13,4	16	18	19	21	22	24	25						
13,6	15	17	19	20	22	23	25						
13,8	15	16	18	20	21	23	24						
14,0	14	16	17	19	21	22	24						

tée, on n'en pourrait plus conclure l'humidité de l'air. Il faudrait que la boule fût mouillée par avance et que l'observation pût être faite avant que l'eau fût gelée. »

De son côté, M. Marié-Davy adresse aux observateurs les recommandations ci-après :

« Le thermomètre mouillé porte quelquefois sur sa tige un petit entonnoir fixé par un bouchon fendu latéralement pour l'écoulement graduel de l'eau. D'autres constructeurs disposent, à côté de l'instrument, un petit tube réservoir qui est mis en communication avec la boule du thermomètre par quelques brins de mèche de coton.

« Dans les grandes sécheresses, l'entonnoir peut être insuffisant; pendant les gelées, le tube réservoir se casse. Dans ces deux cas, on peut faire usage d'une petite fiole contenant de l'eau à la température ordinaire, dans laquelle on plonge le thermomètre pour le mouiller, quatre à cinq minutes avant l'observation. Ce temps suffit pour que le thermomètre prenne la température que lui donne l'évaporation de l'eau qui le recouvre. On aura soin, dans ce cas, de commencer l'ensemble des observations par mouiller le thermomètre, puis on réglera le baromètre, dont on fera la lecture, et l'on reviendra vers les thermomètres sec et mouillé, pour les lire, en attendant quelques instants, afin de s'assurer que le thermomètre mouillé ne varie plus autrement que par l'effet du changement de la température de l'air. »

Résultats. — Dans l'Annuaire météorologique de 1875, M. Marié-Davy ajoute que les indications du psychromètre sont assez exactes dans les temps chauds et quand il n'est pas exposé à de trop grands vents. Il devient très-incertain dans le voisinage de la température de la glace fondante. Dans les grands froids, il manque un peu de sensibilité.

Dans l'année météorologique 1873-1874, les moyennes mensuelles de l'état hygrométrique à Paris, ont été les suivantes :

1873			1874		
OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.
82	84	89	86	77	73

1874					
AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.
67	67	64	62	64	74

C'est en hiver que l'on s'approche le plus du point de saturation; en été, au contraire, l'état hygrométrique trouve son minimum. Il descend rarement au-dessous de 50 et, exceptionnellement, au-dessous de 40.

Au lieu de l'état hygrométrique, si on considère la tension réelle de la vapeur d'eau mélangée à l'atmosphère, on arrive aux nombres ci-après :

1873			1874		
OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.
8mm,1	6mm,4	5mm,2	5mm,6	4mm,8	5mm,4

1874					
AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.
6mm,5	6mm,8	9mm,1	10mm,8	9mm,2	9mm,9

La tension réelle de la vapeur est minima par les grands froids et maxima pendant les mois chauds. Il s'est produit au mois d'août une tension de près de 15 millimètres et une tension de 2 millimètres seulement en février.

Pendant la saison froide de 1873-1874, le minimum diurne de la tension de la vapeur mêlée à l'air atmosphérique s'est produit entre trois et six heures du matin; en décembre, il ne s'est produit qu'à six heures; le maximum entre onze heures du matin et une heure de l'après-midi.

Pendant la saison chaude de la même année (avril à septembre 1874), on a constaté par jour deux minima se produisant entre trois et quatre heures du matin, trois et cinq heures du soir, et deux maxima se produisant entre huit et dix heures du matin, neuf et onze heures du soir.

Si l'on compare les moyennes mensuelles de l'année 1873-1874 à celles de l'année précédente 1872-1873, on trouve que ces moyennes diffèrent assez peu; le plus grand écart, correspondant au mois d'août, n'est que de 1 millimètre et demi.

4° DES VENTS.

Observation des vents. — L'observation des vents porte sur deux points : la direction et l'intensité.

Direction des vents. — C'est la girouette qui donne la direction des vents. Tout le monde connaît cet appareil : c'est une plaque verticale mobile autour d'un axe également vertical; cette plaque, profilée en forme de flèche, se place dans la direction du vent et, comme la pointe de la flèche présente à la pres-

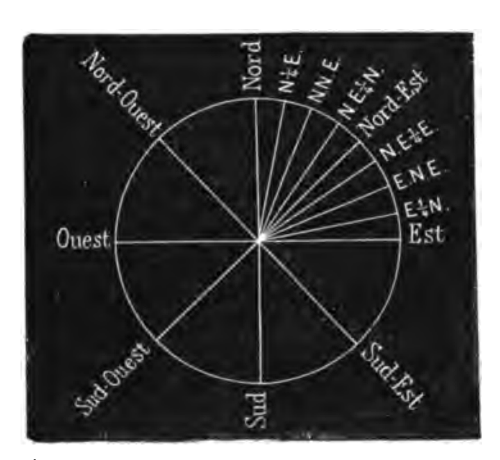


Fig. 8.

sion du vent une surface moindre que celle de la partie opposée, l'équilibre ne peut s'établir qu'autant que la pointe est tournée contre le vent. Cette pointe indique donc sans cesse la direction d'où souffle le vent.

La girouette se meut au-dessus d'une rose des vents indiquant les quatre points cardinaux avec leurs divisions intermédiaires et d'un coup d'œil on reconnaît à chaque instant la direction du vent.

En météorologie, comme en navigation, on reconnaît seize aires de vents principales, savoir :

Nord, nord-nord-est, nord-est, est-nord-est;

Est, est-sud-est. sud-est, sud-sud-est;

Sud, sud-sud-ouest, sud-ouest, ouest-sud-ouest;

Ouest, ouest-nord-ouest, nord-ouest, nord-nord-ouest,

et chaque aire se distingue par les initiales des mots qui les désignent : ainsi nord-nord-ouest s'écrit N. N. O. et est-sud-est s'écrie E. S. E.

On divise une aire en deux quarts de sorte que l'horizon se partage en trente-deux quarts de vent.

Lorsqu'on observe en un lieu la direction du vent, on la rapporte en général à la direction de l'aiguille aimantée, c'est-à-dire au nord magnétique, lequel diffère, comme on sait, du nord géographique d'un certain angle appelé déclinaison. La déclinaison est variable aux divers points du globe.

Maury admettait que, vu le peu de précision des observations, on pouvait négliger la déclinaison du lieu lorsqu'elle était inférieure à un quart ou à 11°,151,

Cependant, comme la correction est toujours facile à faire, il vaut mieux l'effectuer immédiatement après chaque observation.

Ce qui vaut mieux encore, et ce qui est bien facile pour les observatoires terrestres, c'est de diriger la ligne N. S. de la rose des vents suivant le méridien géographique, on n'a plus alors à s'inquiéter de correction.

La girouette doit être montée avec soin ; elle doit posséder une grande mobilité et être également sensible en tous sens, ce qui n'aura lieu que si elle est bien équilibrée sur l'axe de rotation.

Elle doit être placée au sommet d'un édifice élevé ou isolée de toutes parts, afin d'être soustraite aux remous que déterminent toujours dans l'atmosphère les arbres et les habitations du voisinage.

Intensité du vent. — La force ou intensité du vent s'évaluent d'ordinaire par estime. Les marins se servent à cet effet de l'échelle de Beaufort, qui comprend les nombres 0 à 12 correspondant aux diverses allures d'un bâtiment à voiles, depuis le calme jusqu'à l'ouragan.

L'Annuaire météorologique indique l'échelle suivante :

TERMES ORDINAIRES.	VITESSE DU VENT EN KILOMÈTRES A L'HEURE.	TERMES DE MARINE.	
Calme.	0 à 4	Calme.	
Faible.	4 à 14	Petite brise.	
Modéré.	15 à 25	Jolie brise.	
Assez fort.	25 à 60	Bonne brise.	fraîches brises.
Fort.	60 à 80	Forte brise. .	
Très-fort.	80 à 100	Grand frais. .	grande brise.
Violent.	100 à 130	Coup de vent.	tempête. . . .
Ouragan.	130 à 140	Ouragan. . .	

On conçoit que ces dénominations laissent toujours un certain vague; aussi les météorologistes et les navigatenrs regrettent-ils qu'on n'ait pas encore construit jusqu'à présent un anémomètre simple et commode.

Nous avons décrit précédemment l'anémomètre de M. Combes, analogue au

moulinet de Woltmann, dont on se sert en hydraulique ; c'est un petit moulin à vent dont l'axe tourne plus ou moins vite suivant que la vitesse du courant gazeux, qui vient choquer les ailes, est plus ou moins forte. Le nombre des tours de l'axe est enregistré par un système de roues dentées et, grâce à une graduation préalable facile à faire en transportant l'appareil avec une vitesse connue dans une atmosphère calme, on peut apprécier la vitesse du courant d'après le nombre de tours.

L'amirauté anglaise recommande l'usage de l'anémomètre de Lind, qui mesure l'intensité du vent par la pression qu'il exerce à la surface de l'eau contenue dans un tube en V, dont une des branches est soumise à l'action du vent ; c'est un appareil analogue au tube hydraulique de Pitot. Le liquide, refoulé dans la branche exposée au vent, s'élève dans l'autre branche ; la lecture de la dénivellation correspond à une certaine vitesse qu'on a obtenue par l'expérience directe.

Au dernier siècle on avait construit des girouettes enregistreuses ; quelques appareils de ce genre ont été perfectionnés et installés dans les grands ports de mer. Le plus complet est l'appareil du docteur Robinson, qui enregistre à la fois l'intensité et la direction du vent.

En ce qui touche l'intensité, elle se mesure par le nombre de tours qu'exécute par seconde un appareil composé de deux bras horizontaux rectangulaires, terminés à chaque bout par une demi-sphère creuse ; les quatre demi-sphères ont leur concavité dans le même sens. Sous le souffle du vent, tout l'appareil se met à tourner avec une vitesse qui suit les variations de l'intensité du vent. La girouette entraîne dans son mouvement une roue horizontale munie d'une dent qui, à chaque tour de la girouette, fait avancer d'un cran une autre roue dentée horizontale, laquelle porte 200 dents. Aux deux extrémités d'un diamètre de cette dernière roue on a implanté des pointes métalliques qui viennent successivement en contact avec le fil d'un électro-aimant ; à ce moment, le courant électrique est ouvert et soulève un petit marteau à stylet, qui retombe sur un papier mu d'un mouvement uniforme par un mécanisme d'horlogerie. Ainsi, toutes les fois que la roue dentée horizontale s'est avancée de 100 dents, c'est à dire après chaque centaine de tours de la girouette, le marteau électrique marque un point sur le papier ; le mouvement de progression uniforme du papier est connu ; par suite, l'espacement des points permet de mesurer la vitesse du vent. L'appareil a été gradué d'abord par des expériences spéciales.

Fig. 9.

En ce qui touche la direction, elle s'obtient par une girouette à aubes hélicoïdales, laquelle est très-sensible ; à la base de la tige verticale est un doigt horizontal qui prend à chaque instant la direction du vent et qui se meut au-dessus d'un papier horizontal sur lequel est inscrite la rose des vents. Toutes les dix minutes un contact électrique s'établit et un pointage est marqué sur la feuille ; les points successifs indiquent les directions successives du vent.

Dans ses instructions météorologiques, M. Renou a indiqué diverses dispositions de girouettes qui, si elles n'ont pas été appliquées, méritent d'être signalées.

Pour mesurer la force du vent, on a essayé quelquefois une plaque carrée suspendue par son arête horizontale supérieure et que le vent fait dévier de la position verticale qu'elle prend naturellement dans un air calme. On n'a jamais tiré grand parti de cette disposition si simple, parce que la plaque oscille con-

tinuellement; mais on pourrait, sans doute, la rendre pratique par quelques perfectionnements.

On a employé aussi un dynanomètre, c'est-à-dire un ressort dont la force est déterminée en poids, et que le vent comprime par l'intermédiaire d'une plaque verticale qui le presse horizontalement.

La manière la plus directe, et peut-être la plus commode, serait d'employer un petit ballon rempli de gaz d'éclairage et, à très-peu près, en équilibre avec l'air, de manière qu'il marche horizontalement; on l'attache avec un fil de 100 mètres de longueur, par exemple, et on compte combien de temps il emploie pour arriver à l'extrémité de ce fil.

Le vent diminue beaucoup de vitesse et de régularité en approchant du sol, surtout si le terrain est couvert d'arbres, de maisons, enfin d'obstacles quelconques; ce n'est qu'à une certaine hauteur, et, dans les villes, au sommet de tours élevées, qu'on peut obtenir des nombres de quelque valeur, encore faut-il que le sommet de ces tours ne soit pas dominé par des collines. Tout le monde sait combien le vent tourbillonne et éprouve des variations brusques de direction et d'intensité; au sommet des montagnes, au contraire, le vent est toujours fort régulier; les irrégularités ne s'y reproduisent que de temps en temps, et elles ont alors une signification réelle en rapport avec l'état de l'atmosphère.

Vents supérieurs. — On est souvent étonné de voir les nuages marcher en sens contraire de la direction qu'affecte le vent près du sol. L'Océan atmosphérique a ses courants superposés de vitesse et de direction variables; un courant peut régner près de la terre, tandis que l'atmosphère supérieure est calme ou animée de mouvements contraires. Nous verrons plus loin l'explication de ces phénomènes. Lorsque la marche des nuages diffère de celle du vent, l'observateur doit le noter avec soin et, autant que possible, indiquer la vitesse des nuages.

Cartes des vents. — Pour coordonner les observations et en déduire les résultats d'ensemble, il est nécessaire de leur donner une représentation graphique. Voici celle qu'adoptait Maury et que suivent les navigateurs :

On divise l'Océan en une série de carrés comme celui de la figure 10, qui représente l'espace compris entre 5° et 10° latitude nord, entre 110° et 115° longitude est. Dans la colonne verticale de gauche on écrit les seize aires de vent, et dans la colonne horizontale supérieure les douze mois de l'année. Chaque navire a noté sur son journal de bord la direction moyenne du vent de huit en huit heures, il y a donc trois observations en vingt-quatre heures; chaque observation est marquée par un point dans la case qui correspond au rumb du vent considéré et au mois dans lequel l'observation a été faite.

A l'inspection du carré, on reconnaît immédiatement à quelle époque souffle tel ou tel vent; dans l'exemple que nous avons choisi, les vents du nord et du nord-nord-est soufflent pendant les mois de janvier et de février; c'est une indication précieuse pour le navigateur, qui reconnaît aussi que les vents contraires souffleront en septembre et octobre.

On comprend, sans peine, toute l'importance qui peut s'attacher à ces cartes lorsqu'elles résultent d'observations longues et nombreuses; à chaque époque, on saura quels vents on a chance de rencontrer dans telle ou telle région, on saura, par conséquent, quelle route on doit suivre pour aller, avec le moins de contre-temps possible, d'un point de la carte à un autre.

Les cartes de vent françaises ont une forme différente; lorsqu'on a opéré le dépouillement des journaux de bord au moyen du carré de Maury, on trace sur une feuille de papier les seize directions principales du vent, et sur chaque di-

rection on prend une longueur proportionnelle au nombre de jours pendant lesquels le vent a soufflé dans cette direction, — par exemple, si le relevé in-

Vents	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep.bre	Oct.bre	Nov.bre	Déc.bre
Nord												
N.N.E.												
N.E.												
E.N.E.												
Est												
E.S.E.												
S.E.												
S.S.E.												
Sud												
S.S.O.												
S.O.												
O.S.O.												
Ouest												
O.N.O.												
N.O.												
N.N.O.												
Calmes												

Fig 10

dique cent vents de N. E. pour cinquante vents de S. O., le rayon N. E. sera double en longueur du rayon S. O. Il est bien entendu que la direction du vent



Fig. 11.

part du centre de la circonférence, c'est-à-dire que le rayon dirigé vers l'ouest sur le papier mesure les vents d'est (fig. 11).

En adoptant, pour chaque carré de la surface terrestre, une échelle constante,

on pourra comparer d'un coup d'œil le régime des vents en deux régions différentes.

Les observations de calmes, que rien ne représente, sont indiquées dans un coin de la feuille, et on marque dans un autre coin le nombre total des observations qui ont servi à dresser la carte.

L'étude des vents est beaucoup plus importante et beaucoup plus facile sur mer que sur terre. Sur mer, les courants aériens ont un immense espace libre, et rien ne les arrête dans leur marche; aussi se font-ils remarquer par une certaine constance. Sur terre, le relief du sol exerce sur les vents une énorme influence, et des observations, faites à des distances rapprochées, à des hauteurs peu différentes, pourront donner des résultats dénués de concordance. L'observation des vents terrestres, à une faible hauteur au-dessus du sol, ne comporte donc pas une précision bien grande, et il semble inutile, en l'état actuel des choses, de mesurer rigoureusement l'intensité du vent.

Des vents à Paris.— D'après Kaemtz, les vents à Paris se répartissent comme il suit entre les huit principales directions de la rose des vents :

Nord.	12,7
Nord-Est.	11,6
Est.	6,4
Sud-Est.	5,5
Sud.	17,3
Sud-Ouest.	18,1
Ouest.	19,0
Nord-Ouest.	9,4
	100,0

Si l'on compose toutes ces quantités, conformément au principe dont la fig. 11 est l'image, on reconnaît que la direction moyenne du vent à Paris, c'est-à-dire le vent régnant est S. 68° O. C'est donc un courant équatorial qui vient réchauffer les côtes de la France.

Les vents régnants des divers mois de l'année sont à Paris :

Janvier.	S. 66° O.	Juillet.	N. 86° O.
Février.	S. 48° O.	Août.	S. 80° O.
Mars.	N. 59° O.	Septembre.	S. 68° O.
Avril.	N. 49° O.	Octobre.	S. 24° O.
Mai.	S. 61° O.	Novembre.	S. 52° O.
Juin.	N. 60° O.	Décembre.	S. 39° O.

Des grands courants de l'atmosphère. — Si les continents, avec leur relief accidenté, produisent sur les vents des perturbations qui voilent les lois générales des mouvements de l'atmosphère, il n'en est pas de même au milieu de l'Océan ; là, les courants atmosphériques se développent et se meuvent librement, et il est relativement facile de démêler les lois qui les régissent.

L'action calorifique du soleil s'exerce inégalement aux diverses latitudes du globe, puisque la surface terrestre qui dans le voisinage de l'équateur reçoit normalement les rayons du soleil ne les reçoit plus que longitudinalement vers le pôle. C'est à cette inégalité des quantités de chaleur reçues qu'il faut attribuer non-seulement les différences de végétation, mais encore les grands courants de la mer et de l'océan atmosphérique.

Supposez que la terre soit une sphère parfaite, à surface de nature constante,

chauffée également de toutes parts, l'atmosphère gazeuse qui la surmonte demeurerait immobile et se disposerait par couches sphériques, dont la densité irait en décroissant d'une manière continue à partir du sol. Mais, cette régularité de formes, cette constance dans la chaleur reçue n'existent pas; à chaque instant, la température des molécules gazeuses se modifie, et par suite leur densité; l'état d'équilibre est sans cesse interrompu, et l'atmosphère est animée de mouvements perpétuels.

L'air absorbe peu les rayons calorifiques du soleil; il s'échauffe ou se refroidit surtout au contact du sol. Ce sont donc les couches atmosphériques voisines de la terre qui s'échauffent le plus sous l'action du soleil; elles se dilatent par la chaleur et tendent à monter à la surface de l'océan aérien, comme l'huile remonte à la surface de l'eau. L'air chaud qui s'élève détermine un afflux d'air plus lourd et plus froid, et de ce mécanisme simple résultent les mouvements généraux de l'atmosphère, mouvements généraux qui, sur les continents, se trouvent contrariés et masqués par les inégalités de la surface terrestre.

C'est donc à la surface du grand Océan que l'on peut étudier et mettre en évidence les lois de ces grands mouvements généraux, dont l'atmosphère est agitée.

Ils sont produits, avons-nous dit, par l'inégalité des quantités de chaleur que le soleil verse sur les diverses régions, mais ils sont modifiés dans leur allure par la rotation de la terre.

La terre tourne sur son axe en vingt-quatre heures, de l'occident vers l'orient; le méridien terrestre a quarante millions de mètres de développement; la vitesse de circulation d'un point de la terre situé à l'équateur est donc d'environ 460 mètres à la seconde; mais cette vitesse de circulation diminue depuis l'équateur jusqu'aux pôles où elle s'annule, et ce phénomène influe sur les courants atmosphériques qui ne sont pas parallèles à l'équateur. La rotation de la terre intervient donc à chaque instant pour modifier les courants produits par la chaleur solaire.

Considérons, par exemple, un courant gazeux dirigé de l'équateur vers le pôle nord, il arrive sur les parallèles successifs avec la vitesse de circulation qu'il avait vers l'équateur, c'est à dire avec une vitesse de l'ouest à l'est plus grande que celle qui existe sur les parallèles, il a donc, par rapport à la partie de l'atmosphère qu'il traverse, un excès de vitesse de l'ouest à l'est. Cet excès de vitesse se combine avec l'autre vitesse normale, qui va de l'équateur au pôle, et il en résulte un courant aérien infléchi vers l'est; ce courant se dirige vers le nord-est et semble souffler du sud-ouest, tandis que, sans la rotation de la terre, il eût soufflé du sud.

Au contraire, prenez un courant dirigé du pôle nord à l'équateur: à mesure qu'il s'avance, il rencontre des vitesses de circulation de l'ouest à l'est plus grandes que la sienne; l'observateur, entraîné dans le mouvement de la terre, vient donc choquer le vent avec une vitesse égale à la différence entre la vitesse de circulation sur le parallèle considéré et la vitesse de translation vers l'est que possédait originairement le courant gazeux. Le mouvement relatif étant le seul qui nous intéresse, l'observateur est choqué en réalité par un courant venant de l'est; il en résulte que le courant venant du nord est infléchi vers l'ouest et semble souffler du nord-est.

Considérons dans l'atmosphère un courant ascendant; il part du sol avec une certaine vitesse de circulation de l'ouest à l'est, vitesse qui dépend de la latitude, et, en vertu de l'inertie, il conserve cette vitesse à mesure qu'il s'élève;

or, il rencontre des zones situées à une plus grande distance de l'axe de la terre et par suite animées d'une plus grande vitesse de circulation. Le courant ascendant restera donc en arrière des couches successives qu'il rencontrera dans sa marche et sera dévié vers l'ouest par le mouvement relatif. L'effet inverse se produirait sur un courant descendant.

Dans ce premier aperçu nous n'avons pas tenu compte du mouvement de la terre autour du soleil, c'est-à-dire de l'inclinaison de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre) sur l'équateur terrestre. Nous avons supposé que le soleil se mouvait toujours dans le plan de l'équateur terrestre ; en réalité il se meut entre deux parallèles, les deux tropiques, situés à 23°,28′ de l'équateur, l'un au nord, l'autre au sud. L'action calorifique maxima ne s'exerce donc pas constamment à l'équateur ; elle se déplace avec les saisons, et ce déplacement doit entraîner des modifications continuelles dans les courants atmosphériques. La constance de ces courants n'est donc pas absolue ; chaque année, ils passent périodiquement par les mêmes phases, et les lois générales peuvent s'établir en comparant les observations faites aux mêmes saisons dans une longue série d'années.

Certains auteurs ont cru reconnaître l'influence de la lune sur les mouvements de l'atmosphère ; cette influence, si elle existe, est peu sensible et n'a pas encore été mise en évidence.

Répartition des vents sur le globe. — C'est à Maury que l'on doit la division du globe en zones de vents : bien que son système et ses théories aient été attaqués, ils n'en conservent pas moins une immense portée et trouvent dans les considérations mécaniques les plus simples leur explication rationnelle.

Voici la description des diverses zones de vents donnée par MM. les ingénieurs Ploix et Caspari dans leur *Météorologie nautique :*

« Dans l'Atlantique, de 60° nord (on n'a guère d'observations au delà) jusque par 30° ou 35°, les vents dominants sont les vents du S. O. qui soufflent 164 jours par an ; et, après eux, les vents du N. O. Les vents de la région de l'ouest y soufflent en tout pendant 259 jours. Jusqu'au 35e degré de latitude nord, ces vents continuent à dominer, le N. O. devenant plus fréquent et soufflant aussi souvent que le sud-ouest.

« Entre 30° et 35°, le vent souffle à peu près également de toutes les directions; ensuite, on voit que les vents d'est prennent le dessus. Ce sont surtout les vents de N. E. jusqu'à l'équateur, puis les vents de S. E. jusqu'au 30e degré de latitude sud. Entre 30° et 35° sud, le vent souffle à peu près également dans toutes les directions. Ensuite les vents d'ouest dominent, d'abord le N. O. et le S. O. également ; puis le N. O. prend peu à peu le dessus jusqu'au parallèle de 60° sud.

« Ainsi, en descendant du nord au sud de l'océan Atlantique, nous trouvons des zones de vent bien définies, bien tranchées : vents d'ouest, et principalement de S. O., dans les régions extratropicales du nord ; vents de N. E. dans la région tropicale au nord de l'équateur ; vents de S. E dans la région tropicale au sud de l'équateur ; vents d'ouest et principalement de N. O. dans les régions extratropicales du sud.

« La constance des vents de N. E. et de S. E. au nord et au sud de l'équateur avait été observée il y a bien longtemps : ces vents ont reçu le nom de **vents alizés.** Maury, en faisant observer combien les vents de S. O. et les vents de N. O. dans les régions extratropicales sont également permanents, les a désignés sous le nom de **contre-alizés du nord** (S. O.) et **contre-alizés du sud** (N. O.).

« Entre deux zones de vents différents il y a une zone de calmes et de brises

variables. Entre les alizés du nord et du sud est la zone des calmes équatoriaux (doldrums). Entre les alizés et leurs contre-alizés sont deux zones de calmes que Maury désigne sous le nom de calmes des tropiques.

« Les vents sont donc symétriques de part et d'autre de l'équateur. Dans les autres océans on peut observer des phénomènes analogues, et nous pouvons admettre comme une loi générale résultant des observations : une zone de calmes aux environs de l'équateur; des alizés ou vents polaires, affluant du nord et du sud vers l'équateur dans les régions tropicales; des zones de calmes ou de brises variables au nord et au sud vers les parallèles de 30° ; des contre-alizés ou vents équatoriaux, c'est-à-dire soufflant vers les pôles, du côté polaire de ces zones de calmes et jusqu'aux parallèles de 60° ou 70°.

« Tel serait le régime des vents dans les mers ouvertes. Dans les régions tropicales, on sait qu'on peut, grâce aux alizés, se diriger de l'est à l'ouest avec des brises toujours favorables. Maury affirme que, dans les contre-alizés de l'hémisphère sud (là où les continents ne gênent pas le développement du vent), on peut acquérir encore de plus grandes vitesses en se dirigeant de l'ouest à l'est, grâce au vent et à la longue houle qu'il y développe par sa continuité.

« Si la terre était entièrement couverte d'eau, les limites moyennes des différents vents seraient sans doute partout aux mêmes latitudes ; mais on conçoit qu'elles varient d'une mer à l'autre et que, dans une même mer, elles soient quelquefois représentées par des lignes infléchies, à cause des modifications que la forme et la proximité des continents doivent apporter dans les conditions atmosphériques. »

Théorie des vents alizés et des contre-alizés. — Les grands courants de l'atmosphère sont dus, avons-nous dit, à la différence des quantités de chaleur que le soleil envoie aux diverses latitudes. Ces courants sont déviés par la rotation de la terre, et, au lieu de se diriger suivant les méridiens, sont infléchis vers l'est ou vers l'ouest, suivant le sens de leur marche.

L'éminent astronome M. Faye, dans son Étude sur la loi des tempêtes insérée à l'*Annuaire du bureau des longitudes* de 1875, a lumineusement exposé les causes de la production des alizés et des contre-alizés.

« Si l'atmosphère, dit-il, était soustraite à l'action de la chaleur solaire, elle resterait en équilibre ; ses couches successives s'ordonneraient suivant les surfaces de niveau, et elle ferait corps, pour ainsi dire, avec le globe terrestre ; du moins elle en suivrait exactement la rotation jusque dans ses couches les plus hautes. La chaleur solaire a pour effet de troubler constamment cet équilibre, d'y introduire des mouvements d'autant plus curieux qu'ils ne détruisent pas essentiellement la stratification normale des couches atmosphériques. L'air placé au-dessus de l'hémisphère actuellement éclairé se dilate dans ses couches basses, où l'opacité des poussières aériennes et surtout la vapeur d'eau absorbent une si forte part des rayons calorifiques. L'intervention de cette vapeur d'eau qui monte verticalement de couche en couche, a même pour effet de rendre sensible la variation diurne de température à des hauteurs où elle n'atteindrait pas si l'atmosphère était sèche. Le maximum de cette dilatation générale a lieu dans la zone torride sous les rayons verticaux du soleil. De la sorte, le centre de gravité des couches basses monte verticalement ; celles-ci soulèvent les couches supérieures rares, sèches et transparentes, par conséquent peu sensibles aux rayons solaires. Toutes les couches successives, ainsi transportées au-dessus de leurs surfaces de niveau naturelles, tendent à couler, d'un mouvement accéléré, le long de ces surfaces vers les deux pôles dont la température

reste relativement basse. Cet effet est encore augmenté par la marche propre à la vapeur d'eau dont la condensation s'opère principalement aux pôles, d'où elle revient à l'équateur par une autre voie que celle de l'atmosphère, en rasant à l'état liquide la surface du globe. »

La nappe d'air dilaté qui s'épanche ainsi de l'équateur vers les pôles et qui occupe les parties hautes de l'atmosphère détermine dans les parties basses un appel d'air plus dense venant des pôles vers l'équateur.

C'est à cet appel d'air que nous devons les vents alizés ; les courants d'air venant des pôles sont infléchis par la rotation de la terre, comme nous l'avons expliqué plus haut, de sorte qu'au nord de l'équateur les alizés soufflent du nord-est, et qu'au sud de l'équateur ils soufflent du sud-est.

Les alizés sont des vents inférieurs rasant la mer : dans les parties hautes de l'atmosphère on trouve les alizés supérieurs dont la direction générale est de l'équateur vers les pôles ; ces alizés supérieurs sont déviés du mériden par deux causes. Considérons-les dans l'hémisphère nord : au voisinage de l'équateur, la masse d'air qui les forme s'est élevée et, par suite, a rencontré des couches dont la vitesse de rotation autour de l'axe de la terre est plus grande que sa vitesse propre ; la masse d'air, pour ce motif, est donc déviée vers l'ouest, et par suite se dirige vers le nord-ouest.

Mais, à mesure que le courant marche vers le pôle il rencontre des couches dont la vitesse de circulation de l'ouest à l'est va en diminuant, et par suite, le courant tend à dévier vers l'est. Les deux effets sont donc inverses, et dans le voisinage de l'équateur, c'est le premier qui l'emporte ; les alizés supérieurs soufflent donc vers le N. O. dans l'hémisphère nord ; mais, peu à peu, l'effet dû à l'élévation de la masse d'air s'atténue, la tendance à la déviation vers l'est augmente à mesure que la latitude s'accroît, la déviation vers l'est finit par l'emporter, et, à partir d'un certain parallèle, les alizés supérieurs soufflent vers le nord-est, c'est-à-dire semblent venir du S. O.

En même temps, un autre phénomène se produit : à mesure que l'alizé supérieur marche vers le nord, il se refroidit et se comprime puisque le fuseau sphérique qu'il parcourt va se rétrécissant : il augmente donc de densité et se rapproche du sol. Une partie de ce courant revient vers l'équateur en alimentant l'alizé inférieur, l'autre continue sa route vers le N. E., mais en rasant la surface de la mer et en n'obéissant plus qu'au mouvement de déviation dû à la rotation de la terre ; c'est le contre-alizé du nord de Maury.

Ce mécanisme suppose des régions de calme vers l'équateur et aussi vers le parallèle où l'alizé supérieur se rapproche de la terre pour se partager en deux courants, l'un retournant vers l'équateur, l'autre continuant son chemin vers le pôle.

L'observation attentive des faits montre bien que les choses se passent ou, tout au moins, peuvent se passer comme nous venons de le dire ; en effet, les alizés inférieurs soufflent du N. E. entre la latitude 30° et l'équateur, à l'équateur on trouve des zones de calme ; au-dessus des alizés inférieurs, qui se font seuls sentir aux navires, on trouve les alizés supérieurs qui soufflent vers le nord-ouest et qui se manifestent aux regards lorsqu'on peut suivre dans leur marche les nuages des régions élevées de l'atmosphère ; entre les latitudes 30° et 35°, les alizés supérieurs se rapprochent du sol et se divisent en deux parts, dont l'une alimente les alizés inférieurs, tandis que l'autre, continuant sa route vers le nord, engendre les contre-alizés dont l'effet se fait sentir jusqu'à la latitude 60°.

Les contre-alizés sont moins nets et moins réguliers que les alizés, particulièrement dans l'hémisphère nord, parce qu'ils sont modifiés par le relief des continents et par les courants d'air froid venant du pôle.

Vers le pôle, les courants équatoriaux s'arrêtent et se mettent à tourbillonner de l'ouest à l'est.

La figure 12 donne une idée de la disposition respective des alizés et des contre-alizés. La terre est projetée sur un méridien : N. S. est la ligne des pôles, O. E. la projection de l'équateur : nous avons marqué en outre la pro-

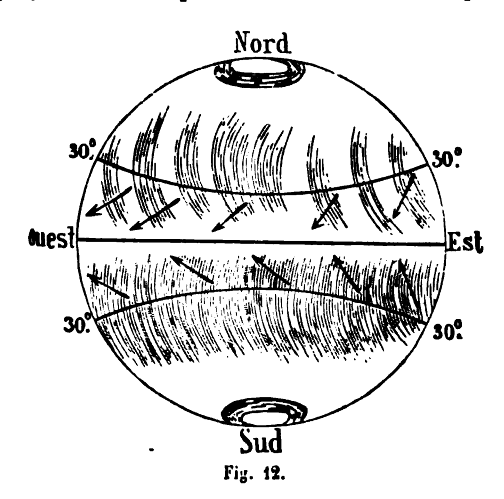


Fig. 12.

jection des deux parallèles correspondant aux latitudes 30°. Les flèches venant du nord-est dans l'hémisphère boréal et du sud-est dans l'hémisphère austral indiquent les alizés inférieurs ; les faisceaux de lignes courbes indiquent, au contraire, les alizés supérieurs et les contre-alizés qui se manifestent au delà des latitudes 30°. Enfin, près des pôles, on a indiqué les tourbillons atmosphériques dirigés suivant des parallèles.

La figure 13 fait comprendre nettement la distribution des vents dans l'Océan Atlantique ; cette figure est extraite de la carte des vents généraux pour le mois d'août. Les zones de calme sont indiquées par des parties ombrées et les flèches marquent en chaque point la direction du vent. Les calmes équatoriaux sont un peu au-dessus de l'équateur, entre 6° et 14° ; en hiver, ils descendent avec le soleil et sont compris entre 0° et 8° latitude nord.

Si l'on se reporte au tableau des hauteurs moyennes barométriques aux diverses latitudes, tableau que nous avons donné précédemment, on reconnaît qu'il y a concordance entre les explications précédentes et les indications du baromètre. Celui-ci dénote un minimum vers l'équateur dans la zone des calmes, au point où l'air se dilate le plus par l'absorption de la chaleur solaire ; au contraire, il dénote un maximum vers 30° et 35° latitude nord, au point où les courants supérieurs se rapprochent de la terre et augmentent de densité.

D'après Maury, la direction moyenne des alizés dans l'hémisphère nord est N. 52° 45′ E. ; et, dans l'hémisphère sud : S. 49° 53′ E.

Comme nous l'avons déjà dit, la régularité des vents se remarque surtout dans l'hémisphère austral, parce que les continents ne les gênent pas dans

leur développement. Aussi les alizés du sud sont-ils plus réguliers et plus constants.

Brises régulières. — Moussons. — La production du vent a toujours pour cause un échauffement local de l'atmosphère. C'est dans la direction où souffle le vent que se trouve le foyer d'appel.

Après les preuves générales qne nous en avons données, il en existe d'autres qui se manifestent sur une échelle beaucoup moindre.

Ainsi, on sait qu'aux bords de l'Océan la brise souffle de la mer pendant le jour et vient de la terre pendant la nuit. Cela tient à ce que le sol s'échauffe

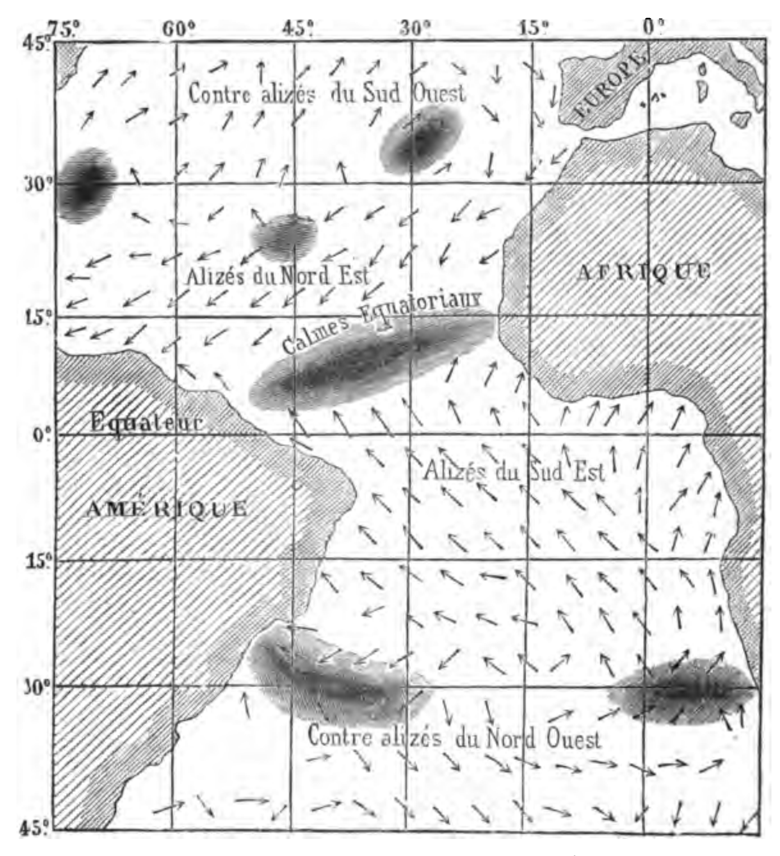


Fig. 13.

ou se refroidit plus vite que l'eau ; pendant le jour, la terre, plus chaude, dilate l'air qui la touche et détermine un appel d'air froid de la mer vers elle ; pendant la nuit, la mer se refroidit moins vite, l'air qui la touche reste plus chaud et, par suite, plus léger que l'air au contact du sol, d'où résulte un appel de la terre vers le large.

Le phénomène des moussons, de l'arabe *mausim*, saisons, si remarquable dans les mers de l'Inde, est dû à une cause analogue : le déplacement du foyer d'appel. Les moussons sont des vents qui, pendant six mois de l'année, soufflent d'un point de l'horizon, et, pendant les six autres mois, d'un autre point dia-

métralement opposé ; c'est au voisinage des continents que les moussons se produisent.

Considérons un point voisin de l'équateur où souffle l'alizé du N. E. et supposons que la zone la plus échauffée, celle où l'air est le plus dilaté et où le baromètre prend sa hauteur minima, que cette zone se transporte au nord du point considéré, la direction de l'appel d'air va se trouver diamétralement intervertie et c'est le vent de S. O. qui va remplacer l'alizé primitif.

Les moussons de la mer des Indes semblent produites par l'échauffement des vastes steppes du continent asiastique ; ces steppes s'échauffent au printemps, elles attirent l'air que l'alizé portait à l'équateur et déterminent un courant de S. O. ; quand la saison froide revient, l'alizé du nord-est se rétablit et se fait sentir librement jusqu'à ce que le retour du printemps détruise à nouveau l'équilibre.

Influence de la direction du vent sur la hauteur barométrique. — Les variations du baromètre sont corrélatives des variations du vent. Lorsqu'un vent souffle du sud vers le nord, il est chaud et chargé de vapeurs, et, par suite, moins pesant que celui qui marche des régions polaires vers l'équateur.

C'est là une loi générale qui, dans les tempêtes, n'est pas toujours vérifiée, car, alors, les ondes comprimées ou dilatées qui se manifestent dans les masses en mouvement ont une action prépondérante ; on voit parfois chaque rafale isolée imprimer à la colonne barométrique de rapides oscillations.

D'un grand nombre d'observations poursuivies à Paris par Bouvard, en 1816 et 1826, résultent les moyennes suivantes :

DIRECTION DU VENT.	HAUTEUR BAROMÉTR.	DIRECTION DU VENT.	HAUTEUR BAROMÉTR.
Sud.	752,8	Nord.	759,8
Sud-Ouest.	753,2	Nord-Est.	759,7
Ouest.	756,0	Est.	757,2
Nord-Ouest.	758,4	Sud-Est.	754,3

C'est donc par les vents du sud que règne le minimum de la hauteur barométrique et par les vents du nord le maximum. L'écart des moyennes est d'environ sept millimètres, quantité relativement considérable.

LOI DE LA ROTATION DES VENTS.

La loi de la rotation des vents est connue depuis longtemps ; elle a été remise en lumière et expliquée par M. Dove. En voici l'énoncé :

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne en général dans le sens des aiguilles d'une montre. Il va de l'ouest à l'est en passant par le nord et de l'est à l'ouest en passant par le sud.

Dans l'hémisphère sud, l'effet inverse se produit.

Cherchons l'explication du phénomène dans l'hémisphère nord. A cet effet, considérons quatre parallèles aa', bb', cc', dd', ce dernier étant le plus voisin de l'équateur (fig. 14).

Supposons que sur le parallèle dd' commence un appel d'air vers l'équateur ; l'appel se fait d'abord sur la tranche atmosphérique du parallèle voisin cc' et la différence de rotation des deux parallèles n'est pas assez sensible pour que

la déviation du courant gazeux vers l'est soit bien accentuée ; le vent semble donc d'abord souffler du nord, comme le montre la flèche.

Considérons maintenant l'appel d'air se prolongeant jusqu'au parallèle *bb'*, le courant arrive en *dd'* avec une vitesse de rotation de l'ouest à l'est moindre que celle du sol, il en résulte un choc qui vient de l'est et le vent semble venir

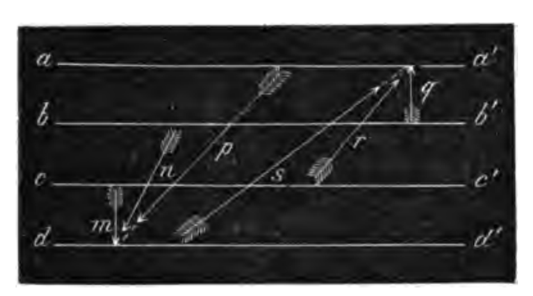


Fig. 14.

d'une direction intermédiaire entre le nord et le nord-est. Enfin, si l'appel d'air monte jusqu'en *aa'* la déviation à l'est s'accentue encore ; c'est ce qu'indiquent les flèches *m*, *n*, *p*.

Soit, au contraire, un courant équatorial, c'est-à-dire un appel s'établissant de l'équateur vers le pôle ; la première couche qui arrive en *aa'* vient du parallèle voisin *bb'* ; bien qu'elle passe d'un point dans un autre où la rotation de l'ouest à l'est est moins vive et que, par conséquent, elle conserve un excès de vitesse de l'ouest vers l'est, elle semble encore souffler du sud parce que la différence de rotation est peu accusée. Mais, pour les courants venant des parallèles *cc'*, *dd'*, la différence de rotation produit son effet, l'excès de vitesse de l'ouest à l'est se manifeste de plus en plus dans les masses affluentes et le vent s'infléchit peu à peu vers l'ouest, ainsi que l'indiquent les flèches *q*, *r*, *s*.

Un courant polaire existant vient-il à être combattu par un courant équatorial, à mesure que celui-ci augmente, la résultante des forces *s* et *p* s'infléchit vers le sud, et, quand le courant équatorial s'est établi, c'est la direction du sud et la rotation vers l'ouest qui commence.

Inversement, un courant équatorial vient-il à être remplacé par un courant polaire, peu à peu la résultante s'infléchit de l'ouest vers le nord ; elle atteint le nord quand le courant polaire reste seul et continue sa rotation vers l'est, comme nous l'avons dit tout à l'heure.

Il n'y a d'exception à la loi de rotation que nous venons de démontrer que lorsqu'un courant polaire, par exemple, s'éteint peu à peu par suite du frottement et finit par tourner complétement à l'est ; si l'appel vers l'équateur recommence alors à se faire sentir, le vent retourne vers le nord pour revenir ensuite vers l'est. Mais c'est là un accident, car à un courant succède presque toujours un courant de sens contraire.

Des tempêtes. — On distingue plusieurs espèces de tempêtes : les plus connues et les plus fréquentes dans nos pays sont les coups de vent, courants violents qui soufflent dans une direction à peu près constante.

Les régions tropicales se font remarquer par la constance des phénomènes atmosphériques ; néanmoins, cette constance est de temps en temps troublée par des ouragans d'une violence inouïe qui causent les plus grands ravages.

Ce sont les tempêtes tournantes ou cyclones, qui portent encore le nom de tornades et de typhons.

Ces tempêtes sont une amplification des remous de nos rivières : elles se composent d'une masse d'air tournant autour d'un axe animé lui-même d'un mouvement de progression.

La figure 15 donne, d'après M. Faye, une idée de l'ouragan de Cuba du 5 au 7 octobre 1844, lequel ravagea la Havane et fit sombrer ou démâta soixante-dix navires. Le 5 octobre, à 9 heures du soir, le centre du cyclone était en face de la Floride et le 7 octobre, à 9 heures du matin, un peu au-dessus de Boston. Les flèches indiquent en chaque point la direction du vent relevée sur les journaux de bord. On voit que la rotation circulaire autour de l'axe du cyclone est nettement accusée ; cette rotation est accompagnée d'un mouvement de translation suivant la ligne AB. En établissant le diagramme de la tempête, non pas en deux positions seulement, mais à des intervalles assez rapprochés, il sera facile de réunir sur une carte toutes les circonstances du cyclone.

On remarquera sur la figure 15 que la rotation, marquée par les flèches, s'effectue de droite à gauche, c'est-à-dire dans le sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

C'est toujours dans ce sens que s'effectue la rotation des cyclones dans l'hémisphère nord ; dans l'hémisphère sud, au contraire, la rotation se fait toujours de gauche à droite, c'est-à-dire dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre.

Fig. 15.

La rotation persiste dans le même sens sur tout le parcours du cyclone, parcours qui atteint souvent plus de 600 lieues.

La figure 16 représente un cyclone de l'hémisphère boréal et le suit dans sa marche à partir de l'équateur. « Les lignes suivies par les centres de ces cyclones, dit M. Faye, ne descendent pas de l'équateur vers l'un ou l'autre pôle : loin de là, elles s'infléchissent d'abord vers l'ouest ; après avoir franchi la limite des vents alizés, elles s'inclinent vers l'est, dans une direction finale grossièrement prpneediculaire à la première.

« Nés non loin de la zone des calmes ou des vents variables, de part et d'autre de cette zone équatoriale, les cyclones n'ont guère plus de deux ou trois degrés au début ; mais, ils s'élargissent progressivement à mesure qu'ils voyagent ainsi, en marchant vers les hautes latitudes. Sur les deux zones tempérées ils atteignent un diamètre de plus de 10 degrés et occupent sur le globe terrestre un espace plus grand que la France.

« Ainsi, tout est symétrique de part et d'autre de l'équateur, ou plutôt de la zone des calmes qui oscille un peu chaque année en suivant le soleil : symétrie dans le sens de la rotation, symétrie dans le sens du mouvement de translation, symétrie générale dans la figure de toutes ces trajectoires, et cela se passe ainsi tou autour du globe terrestre. »

La figure 16 indique la trajectoire d'un cyclone de l'hémisphère nord. De

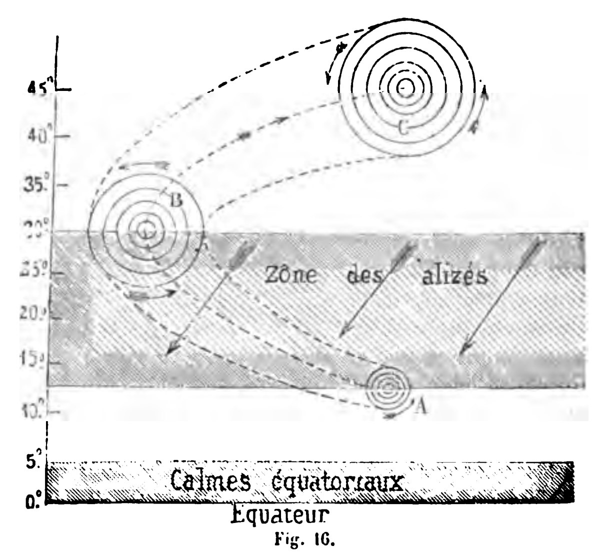


Fig. 16.

0° à 5° latitude nord règne la zone des calmes ou vents variables. Vers 15 degrés commencent les alizés du nord-est qui s'étendent jusqu'à la latitude 30 degrés. C'est à la limite inférieure des alizés que les cyclones prennent naissance ; on ne saurait mieux les comparer qu'à une toupie tournant de droite à gauche (en sens inverse des aiguilles d'une montre) et animée d'un mouvement de progression, dont la trajectoire a la figure d'une parabole ayant sa concavité dirigée vers l'est. L'ouragan se dirige d'abord vers l'ouest, puis il rebrousse vers l'est lorsqu'il atteint la limite supérieure des alizés.

Nous trouvons dans une causerie scientifique de M. de Parville des détails intéressants sur les effets des cyclones, sur leur puissance et leur marche.

« On s'expliquerait difficilement, dit-il, les effets désastreux que peut produire le vent, si l'on ne se rappelait à propos que tout effet mécanique s'exprime à l'aide du produit de la masse par le carré de la vitesse, algébriquement mv^2. La masse de l'air est insignifiante : un litre d'air pèse 1gr,3, alors qu'un litre d'eau pèse 1 kilogramme. L'air, en chiffre rond, pèse mille fois moins que l'eau.

« Mais l'air peut atteindre des vitesses assurément supérieures à six fois celle d'un train express. L'air avance quelquefois à la vitesse de 40, 45 et même 50

mètres à la seconde. Dans un fleuve dont le courant est rapide, l'eau fait 1 mètre, $1^m,50$ à la seconde, 2 mètres quelquefois.

L'effet mécanique dans le cas de l'eau peut donc se présenter par le nombre 3. Dans le cas de l'air se déplaçant à la vitesse de 50 mètres, par le nombre 2,5. C'est-à-dire que l'air, par suite de sa vitesse, atteint presque la même puissance destructive que l'eau d'un fleuve qui déborde.

« Fresnel estimait qu'un vent de tempête exerçait, par mètre carré, une pression de 275 kilogrammes. Ce chiffre me paraît même un peu faible. On a vu des coups de vent faire dérailler et même renverser des trains. Et l'on admet que pour renverser certains wagons, la pression nécessaire doit être bien près de 400 kilogrammes par mètre carré de surface.

« On connaît, du reste, des exemples frappants de la violence du vent. Le 26 juillet 1825, pendant l'ouragan de la Guadeloupe, une rafale enleva une planche épaisse d'environ deux centimètres et lui fit traverser de part en part un tronc de palmier de quarante centimètres de diamètre. A Calcutta, un bambou fut lancé au travers d'une muraille d'un mètre et demi d'épaisseur ; c'est à peu près la puissance destructive d'un canon de 4. Dans l'île de Saint-Thomas, la forteresse qui défend l'entrée du port fut démolie, en 1837, par un ouragan; des blocs de rochers furent arrachés du fond de la mer par dix et douze mètres d'eau et lancés sur la plage. Sur les bords du Gange, on a vu des navires lancés par la furie de la tempête en pleine campagne. En 1680, un navire fut lancé sur la falaise d'Antigua à plus de trois mètres au-dessus des plus hautes marées. En 1825, pendant le grand cyclone de la Guadeloupe, les navires en rade coulèrent tous ; un capitaine, échappé à la mort par miracle, raconta que son brick avait été comme soulevé par le vent et avait voltigé dans l'air avant de retomber dans les flots. Une quantité énorme de débris, arrachés aux maisons de l'île, des meubles, furent transportés à Montserrat par-dessus un bras de mer de 80 kilomètres de largeur.

« Le 10 octobre 1780, un ouragan s'abattit sur les Barbades et renversa tout ce qui se trouvait sur son passage. Les maisons et les arbres furent jetés par terre ; il fit couler une flotte anglaise tout entière. Aucun village de l'île ne resta debout ; plus de six mille personnes furent écrasées sous les décombres. Le cyclone passa des Barbades à la Martinique ; il enveloppa un convoi de transports français et coula plus de quarante navires portant quatre mille hommes de troupes.

« Sur terre, la ville de Saint-Pierre et d'autres villages voisins furent complétement rasés par le vent et neuf mille personnes périrent. — Le cyclone continua sa route et, bien qu'il eût perdu de sa force, il atteignit encore aux Bermudes plusieurs navires de guerre anglais qu'il coula.

Nos tempêtes d'Europe sont des brises folles à côté des cyclones des Antilles et des typhons de la mer des Indes. Sous les tropiques, le spectacle est terrifiant. La chaleur est étouffante, le baromètre baisse, un nuage noir se montre à l'horizon ; on sait ce que cela veut dire.

« Le canon d'alarme retentit. Les navires à l'ancre dans un port sûr doublent leurs amarres, ceux qui se trouvent dans une rade ouverte à tout vent se hâtent de prendre le large et de fuir. Les habitants prennent toutes leurs précautions pour la lutte. Il s'agit en effet d'une question de vie ou de mort bien souvent La tempête arrive impétueuse, soudainement. Les murs craquent, les arbres crient. Pendant plusieurs heures elle fait rage. Puis brusquement le calme revient, le ciel s'éclaircit. On se trouve au centre du cyclone, mais on n'est pas

hors de danger. Une heure, deux heures, une demi-journée quelquefois se passent; puis tout à coup l'ouragan éclate encore avec une nouvelle furie. C'est la fin, mais quelquefois une fin fatale.

« Les raz de marée se mêlent à la tempête pour compléter l'œuvre de destruction, puis la foudre, puis les tremblements de terre.

« En 1831, à la Barbade, la grande vague soulevée par l'ouragan s'éleva de 22 mètres au-dessus du niveau de la mer, emportant les navires sur la terre et inondant l'île.

« Quelquefois, la raréfaction de l'air engendrée par le passage d'un cyclone est si soudaine, que l'air contenu dans les maisons se dilate brusquement et projette au loin les portes et les fenêtres.

« Quelquefois aussi, le ciel est beau, le temps calme, et on voit tomber sur les plantations une pluie d'eau salée et même des poissons. Un cyclone progressant au large télégraphie son passage par ce tour de passe-passe. Les colons des Antilles et les habitants de Calcutta savent à quoi s'en tenir sur les prouesses du vent.

« Sous nos latitudes, nous n'avons pas à craindre les typhons, les tornades et les cyclones. Ce que nous appelons en Europe des cyclones ne sont que les restes des tourbillons équatoriaux; ce sont des cyclones à moitié éteints, déjà épuisés et presque civilisés. Les ravages qu'ils produisent encore suffisent cependant pour nous donner un avant-goût de ce qu'ils sont capables de faire à leur point de départ.

« On a vu tourbillonner l'air le long des grands murs, dans les rues, soulevant la poussière et les feuilles. Voilà le cyclone miniature. Le cyclone sérieux est constitué par une grande masse d'air animée d'un rapide mouvement de rotation; c'est une grande toupie gazeuse pirouettant sur elle-même, un gigantesque anneau d'air tournant autour de son centre. Malheur à qui heurte cette masse tourbillonnante ! Elle vous prend, vous entraîne, et il faut, bon gré, mal gré, valser avec elle. En 1845, un navire fut saisi par cette grande manivelle et ne parvint à lui échapper qu'après avoir décrit en cinq jours cinq grandes spirales de 2,400 kilomètres de développement.

« Les cyclones paraissent naître sous les tropiques. Ils remontent en latitude le long de la côte américaine, puis suivent le *gulf stream*, traversent l'Atlantique le plus souvent à la hauteur de Terre-Neuve et viennent aborder l'Europe, le plus souvent aussi, à la hauteur de l'Irlande.

« Quand ils passent plus haut, au delà de l'Irlande, c'est tant mieux pour nous : le temps reste beau; mais quand ils viennent débarquer à la hauteur de l'Angleterre, le temps se gâte ; quand leur itinéraire s'abaisse encore et qu'ils abordent le continent par le travers de la France, nous avons des pluies torrentielles et des vents furieux.

« On les voit venir, fort heureusement, de loin. L'Observatoire les guette. Le télégraphe renseigne sur leur marche; le baromètre révèle assez bien leur approche, mais, malheureusement, on ne peut pas encore savoir exactement le véritable point de la côte anglaise ou française qu'ils aborderont. On peut les comparer à un paquebot dont l'arrivée est signalée, et qu'un ordre du capitaine peut conduire à Bordeaux ou à Saint-Nazaire, à Cherbourg ou à Plymouth. Il résulte de là que nous savons bien souvent plus de trente-six heures à l'avance quand le mauvais temps nous arrive ; mais nous ignorons généralement quelle sera la région envahie. On ne le sait plus qu'au dernier moment, quand l'itinéraire assez indécis jusqu'alors se trace avec plus de netteté. Lorsque l'on sera

en état de préciser le point d'atterrissage du cyclone, le problème de la prévision du temps à courte échéance sera résolu.

« Les cyclones, en pénétrant sous nos latitudes, gagnent en amplitude ce qu'ils perdent en force. Sous les tropiques, ils mesurent souvent moins de 300 kilomètres ; en Europe, ils se sont dilatés au point de couvrir jusqu'à 800 kilomètres d'étendue. Aussi le vent qui, aux Antilles, brise un navire comme un jouet, abat une ville sans effort, n'est plus capable en France ou en Angleterre que de déraciner des arbres et de renverser des murs déjà ébranlés.

« Le mouvement tournant a perdu de sa régularité, on ne retrouve plus bien le circuit du N.-O., d'O. et de S.-O., c'est-à-dire le côté sud du disque tourbillonnant, qui tourne toujours en sens inverse des aiguilles d'une montre dans notre hémisphère. Le circuit nord est mal tracé; on croit à tort, ou à raison, qu'il s'effectue non plus au ras du sol, mais plus haut dans l'atmosphère, comme si le disque tournant était incliné du nord au sud au lieu d'être horizontal.

« La plupart des cyclones avancent avec une vitesse de 20 à 35 kilomètres à l'heure; ils vont plus vite quand ils s'approchent de nos latitudes; on en a vu qui, en s'approchant de Terre-Neuve, faisaient près de 100 kilomètres à l'heure. Il s'agit du mouvement de translation. Quant à la vitesse de l'air autour de l'axe, elle atteint 150 kilomètres à l'heure dans la partie voisine du centre.

« Quand on se trouve dans la zone animée à la fois du mouvement de translation et du mouvement de rotation, dite *cercle dangereux* par opposition à la zone opposée que l'on nomme *cercle maniable*, on peut très-bien, les deux vitesses s'ajoutant, parcourir jusqu'à 250 kilomètres à l'heure. Sous nos latitudes, ces vitesses sont très-réduites.

« En général, plusieurs cyclones se suivent, sous nos latitudes, à quelques jours d'intervalle; aussi peut-on subir plusieurs tempêtes consécutives.

« Pendant l'été, les cyclones traversent les hautes latitudes, en juin, juillet, août; mais pendant les mois froids, novembre, décembre, janvier, etc., leur itinéraire, qui paraît lié à la marche du soleil, descend vers le sud et le plus souvent les tourbillons traversent notre territoire en s'avançant vers le N.-E., du côté de la Belgique, de la Suède, etc. »

Explication des cyclones. — « L'air et l'eau, dit M. Faye, présentent des gyrations très-complexes, les unes tumultueuses, passagères, sans figure stable, les autres parfaitement régulières et persistantes. Un caractère géométrique très-simple les distingue : les secondes ont toujours leur axe vertical ; les autres tournent autour d'axes diversement inclinés. Un instant de réflexion nous rendra compte de cette différence. Dans le cas d'une gyration horizontale, les spires respectent les couches qui tendraient à se former dans l'état d'équilibre, ou ne les entament que le moins possible. Dans le premier cas, toute notion de couches disparaît, celle de la surface même n'existe plus ; car, à la surface de séparation entre l'eau et l'air, les spires tourbillonnantes sortent de la masse liquide et entament ou entraînent à l'intérieur l'air placé au-dessus, de manière à produire les phénomènes vulgaires connus sous le nom d'embrun, de mousse, d'écume, d'émulsion.

Bornons-nous donc aux mouvements tournants autour d'un axe vertical que les hydrauliciens connaissent et observent, qu'on peut reproduire à volonté et étudier par la voie expérimentale. Ce sont en effet des mouvements réguliers, persistants, obéissant à des lois à la fois très-nettes et fort simples.

Voici une loi générale qui résume tous ces phénomènes. Lorsqu'il existe dans un cours d'eau des différences de vitesse entre les filets juxtaposés latéralement, il tend à se former, aux dépens de ces inégalités, un mouvement gyratoire régulier autour d'un axe vertical. Les spires décrites par les molécules sont sensiblement circulaires et centrées sur l'axe. Ce sont, à parler plus exactement, les spires d'une hélice légèrement conique et descendante, en sorte que, en suivant une molécule dans son mouvement, on la voit tourner circulairement avec rapidité autour de l'axe dont elle se rapproche insensiblement, tout en descendant avec une vitesse bien moindre que la vitesse linéaire de rotation. Évidemment, la force centrifuge qui résulte de ce mouvement gyratoire doit être partout contrebalancée par les pressions du liquide ambiant; il y a donc à l'intérieur de ces spires tournantes, du moins à l'orifice supérieur, un léger abaissement de la pression habituelle qui se décèle à la surface du liquide par une faible dépression conique centrée sur l'axe de rotation.

On démontre par l'analyse les deux propriétés caractéristiques que voici :

1° L'ensemble tournant peut être considéré comme séparé de la masse fluide ambiante, qui reste immobile, par une surface de révolution dont la courbe méridienne a sa concavité tournée vers le bas. En d'autres termes, la figure extérieure du tourbillon est en forme de cône renversé la pointe en bas.

2° La vitesse angulaire d'une molécule que l'on suit dans son mouvement s'accélère à mesure qu'elle se rapproche de l'axe; elle est inversement proportionnelle au carré de sa distance à cette droite. D'après cela, la vitesse linéaire croît elle-même, mais en simple raison inverse de sa distance à l'axe. Si l'on considère combien l'évasement du cône tourbillonnaire dans les cours d'eau est grand parfois, relativement aux dimensions de l'orifice inférieur, on comprendra qu'une gyration, qui paraît lente à la surface et à la circonférence, puisse devenir violente au bas de cette espèce d'entonnoir.

Ces deux lois ne s'appliquent pas aux seuls liquides, mais encore aux gaz.

On les vérifie aisément par l'expérience. Il suffit pour cela de troubler l'eau dans laquelle s'est formé un tourbillon en y jetant des poussières, pour voir se dessiner la figure de l'entonnoir, le mouvement circulaire de la masse entière et l'accroissement de vitesse vers le centre.

Ce mouvement gyratoire, qui concentre ainsi vers la pointe du tourbillon la somme des forces vives que l'entonnoir comprend dans sa vaste ouverture, doit produire vers le fond un travail mécanique quelconque. C'est aussi ce que l'observation confirme. Les tourbillons puissants de nos rivières affouillent le fond qu'ils atteignent et épuisent la force vive qu'ils ont ramassée en haut aux dépens des inégalités de vitesse du courant général. »

Tous ces phénomènes se trouvent dans les masses gazeuses sillonnées par des courants horizontaux. Le mouvement gyratoire affecte la forme d'un entonnoir conique dont la concavité est tournée vers le sol; souvent, cette forme se manifeste à nos yeux lorsque la masse tournante acquiert une certaine opacité, grâce à la vapeur d'eau et aux poussières qu'elle entraîne. On peut le vérifier sur les tourbillons qui traversent une route poudreuse. Ces tourbillons aériens concentrent sur leur pointe toute leur force vive; ils brisent les arbres, enlèvent les maisons et démâtent les navires, de même que les tourbillons des cours d'eau détruisent les obstacles qu'ils rencontrent.

Le mouvement gyratoire est déterminé par la différence des vitesses de deux courants voisins, mais la vitesse moyenne de translation du courant total n'en persiste pas moins, et le tourbillon qui s'est formé n'en continue pas moins à

descendre le fil de l'eau ou à suivre dans l'océan aérien sa direction première.

Dans les rivières, nous apercevons facilement la cause de ces tourbillons voyageurs qu'il ne faut pas confondre avec les remous fixes produits, par exemple, par les piles d'un pont. Dans l'atmosphère, la cause est moins évidente : elle réside dans ces courants supérieurs qui de l'équateur se dirigent vers les pôles et forment la contre partie des alizés rasant le sol. L'existence de ces contre-alizés est le corollaire obligé des courants polaires ; elle se manifeste aux yeux, lors des ouragans, par les masses puissantes de nuages qui courent sur nos têtes en sens contraire du courant dans lequel nous sommes plongés, — Lorsque des différences notables de vitesse viennent à se produire entre deux parties voisines de ces courants supérieurs, le mouvement gyratoire commence; sa vitesse est d'abord faible, mais à mesure qu'il descend et se rapproche du sol, l'influence de la conicité se fait sentir, la vitesse s'accélère, les molécules descendent en décrivant des spires coniques et la force vive initiale, empruntée à des courants puissants, se condense à la partie inférieure; elle le transforme en travail, et toutes les fois qu'elle rencontre un obstacle, elle se brise, ou bien elle refoule et projette de toutes parts les eaux de la mer.

Le mouvement de translation moyen qu'avait le courant supérieur persiste avec la rotation et le tourbillon s'avance de l'équateur vers les pôles, ainsi que le font les contre-alizés. Si nous nous reportons à la figure 12, nous voyons que ces contre-alizés qui ne descendent vers le sol qu'à la latitude 30°, sont d'abord déviés vers l'ouest, puis vers l'est, et que leur trajectoire générale est une parabole dont le sommet se trouverait vers le parallèle 30° à la limite supérieure des alizés.

La translation du centre des cyclones se fait de même suivant une sorte de parabole ABC, comme le montre la figure 16.

A mesure que la pointe conique du tourbillon descend des hauteurs de l'atmosphère vers le sol, elle pénètre dans les régions calmes qui opposent une certaine résistance au mouvement de translation; cette pointe reste donc en retard sur le cercle initial de gyration et la masse conique prend une certaine obliquité dans le sens du mouvement de la translation. Cette obliquité est nettement accusée dans les trombes.

Les tourbillons sont toujours accusés aux yeux, parce que leur périphérie conique est enveloppée d'une gaîne de vapeur d'eau; en effet, l'air froid, qui descend des parties hautes de l'atmosphère, se réchauffe au contact des couches inférieures ; la température de celles-ci s'abaisse, elles abandonnent une partie de leur vapeur d'eau et celle-ci dessine, d'une manière quelquefois très-nette, les contours de la surface conique.

L'air qui descend ainsi s'échappe par la pointe du tourbillon et remonte tumultueusement autour du cône en soulevant les molécules liquides ou solides qu'il rencontre; la pointe du tourbillon est donc accompagnée d'un nuage de poussière et d'écume.

De même que dans les liquides il se produit des tourbillons de toute grandeur depuis celui qui n'a que quelques centimètres jusqu'aux grands tourbillons de l'Océan, de même dans l'atmosphère il se produit de petits tourbillons sans importance, des trombes de quelques mètres de diamètre et des cyclones de 300 ou 400 kilomètres de diamètre initial. Le mécanisme de formation est toujours le même; les effets seuls sont amplifiés.

La surface conique du cyclone n'est généralement pas complète; la pointe théorique se trouve au-dessous de la surface des eaux ; il en résulte à la surface

de l'Océan ces tourbillons d'un vaste diamètre, si dangereux pour le navigateur.

Tout courant atmosphérique venant de l'équateur est dévié vers l'est dans notre hémisphère, et tout courant venant du nord est dévié vers l'ouest; c'est là ce qui explique le sens du mouvement de rotation des cyclones de l'hémisphère nord; cette rotation s'effectue de l'est à l'ouest, c'est-à-dire en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

Les cyclones sont caractérisés par un abaissement souvent considérable de la colonne barométrique; c'est au centre du tourbillon que cet abaissement se fait le plus sentir, par l'effet de la force centrifuge et de la moindre densité de l'air venant d'en haut, il se produit là une sorte de vide; la mer est soulevée et le centre du tourbillon est suivi par une intumescence des eaux qui peut dévaster les côtes sur lesquelles elle va s'abattre.

Les mouvements tumultueux de l'air qui s'échappe enlèvent la crête des vagues et la laissent retomber en écume et en pluie d'eau salée.

La rotation perpétuelle des vents démonte la mer; les vagues s'entrechoquent et se heurtent, et les navires assaillis de toutes parts courent de grands périls.

Ce n'est pas le lieu d'indiquer ici les règles de manœuvre à suivre lors de ces épouvantables ouragans; elles sont indiquées dans les traités spéciaux.

Les cyclones sont précédés de 48 ou 72 heures par une grande houle, par des orages et par un abaissement notable du baromètre, abaissement d'autant plus significatif que les variations de cet appareil sont peu sensibles dans les régions tropicales.

Dans le voisinage du centre des tourbillons la vitesse de rotation peut atteindre jusqu'à 150 milles à l'heure, c'est-à-dire 77 mètres à la seconde.

Quant à la vitesse de translation elle varie de 10 à 30 milles par heure, c'est-à-dire environ de 5 à 15 mètres à la seconde.

Plus de 60 pour cent des cyclones observés dans l'Atlantique nord, se trouvent dans la région des petites et des grandes Antilles.

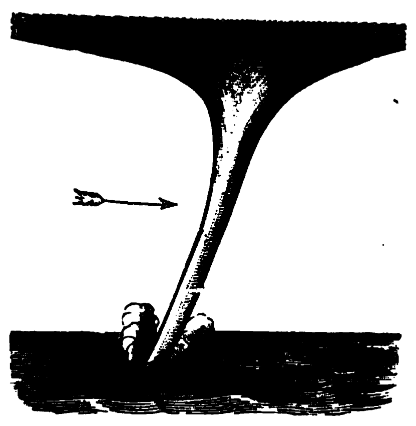
Des trombes. « Au milieu du calme profond qui précède souvent les orages, dit M. Faye dans sa notice déjà plusieurs fois citée, lorsque les couches basses de l'atmosphère n'ont pas le plus léger souffle, arrivent à grande vitesse de lourds nuages qui couvrent le ciel, preuve évidente qu'il règne en haut des courants puissants, dont l'influence ne se propage pas jusqu'au sol.

« De l'un de ces nuages on voit pendre une sorte de poche ou de bout de tuyau qui descend peu à peu en s'allongeant. Il semble formé de la matière même du nuage; et, en effet, c'est un vrai brouillard qui en forme la gaîne et le rend visible à nos yeux.

« Cependant, au sein de ce tuyau, s'agite un tourbillonnement violent dont les petits tourbillons de poussière qui apparaissent parfois sur nos routes donnent une idée très-juste. Quand la trombe vient à toucher le sol et rencontre des obstacles en saillie, elle se met à travailler sur ceux-ci à la manière d'un outil tournant à grande vitesse au bout d'un axe vertical. Elle soulève autour de son extrémité inférieure un nuage de poussière, renverse les arbres ou les casse au pied, abat les murailles, emporte les toitures. — Si, au lieu du sol, la trombe rencontre l'eau, elle agit sur elle comme le ferait une écope hollandaise emmanchée d'équerre au bout d'un axe vertical; l'eau battue circulairement est projetée au loin en écume; s'il s'agit d'une mare, elle est vidée en un instant; s'il s'agit d'un lac ou d'une mer, l'eau jaillit tout autour du pied de la trombe et forme embrun, c'est-à-dire une sorte de poussière aqueuse. »

La trombe est entourée d'un air chargé de vapeur qui remonte dans l'atmos-

phère; il semble aux yeux que la trombe est une colonne d'eau aspirée par les nuages et puisée dans la mer. Aussi, pendant longtemps a-t-on cru que les choses se passaient réellement ainsi, et que les trombes pouvaient aspirer non-seulement l'eau de la mer, mais encore le navire assez malheureux pour se trouver sur leur passage; de cette croyance est née la fable du géant Typhée, que Junon irritée fit sortir un jour de la terre. Au seizième siècle, on exposait que l'eau de la mer était aspirée par les trombes et allait grossir les nuages supérieurs qui se répandaient ensuite en cataractes diluviennes; on enseignait qu'il fallait rompre la trombe à coups de canon pour la crever et la faire tomber loin du navire. Cette théorie ne peut se soutenir, si l'on remarque que l'eau de la trombe est toujours de l'eau douce; cependant elle persiste encore aujourd'hui et nombre de marins soutiennent que les trombes sont dues à l'aspiration exercée sur la mer par les nuages. Est-il possible que de l'eau puisse être aspirée par la raréfaction de l'air à 500 ou 600 mètres de hauteur, contenue comme elle l'est dans un tuyau gazeux? S'il y avait aspiration, est-ce que l'air se redresserait verticalement au pied même de la trombe tournant brusquement d'un angle droit? Le changement de direction ne serait-il pas au contraire progressif?


Fig. 17.

Toutes ces impossibilités montrent bien la fausseté de la théorie de l'aspiration. Au contraire, la théorie de la gyration descendante explique tous les phénomènes avec simplicité. Les trombes ne sont autres que des cyclones de petite dimension qui ont pris naissance au milieu des nuages.

5° ÉTAT DU TEMPS. — PLUIE.

L'observation de l'état du temps comprend divers phénomènes : la pluie, la neige, la grêle, les brouillards, la rosée. — Le principal de ces phénomènes, le plus facile à étudier est la pluie; du reste, la neige et la grêle ne sont que de l'eau solidifiée par le froid, on les recueille dans les pluviomètres où elles se transforment en eau liquide, de sorte qu'elles comptent dans la hauteur de pluie qui tombe dans une année au lieu d'observation.

Pluviomètres. Les appareils qui mesurent la hauteur de pluie tombée sont les pluviomètres, qu'on appelle quelquefois udomètres (expression plus correcte) ou ombromètres.

Autrefois, on ne se préoccupait guère de la forme du pluviomètre; on se servait de vases prismatiques, les uns carrés, les autres ronds.

Puis, pour se mettre en garde contre l'évaporation, on eut recours à l'appareil que représente la figure 18, et qui est encore en usage dans beaucoup de stations.

C'est un réservoir cylindrique ouvert à la partie supérieure : les eaux tombent

dans un entonnoir A et passent en B, où elles se trouvent à peu près à l'abri de l'évaporation. Latéralement, le réservoir porte un tube indicateur en verre C, qui est gradué en millimètres et c'est sur ce tube que l'on lit les hauteurs de pluie tombée. Il convient de noter tous les jours la cote de l'eau, afin de ne point laisser agir l'évaporation. De temps en temps on vide l'appareil et on le remplit d'eau jusqu'à une certaine hauteur.

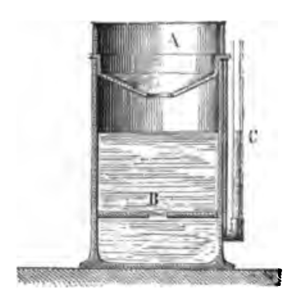
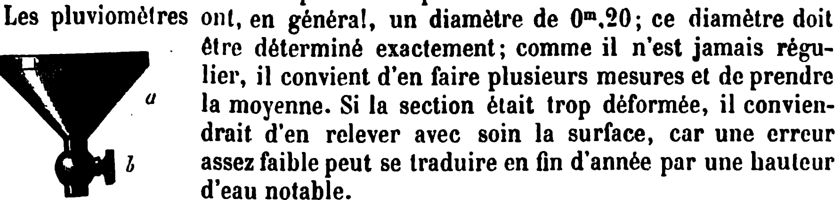


Fig. 18.

Le bord des pluviomètres doit être tranchant et taillé droit à l'intérieur, le biseau étant réservé pour l'extérieur; ce n'est pas le cas du modèle de la figure 18; la disposition qu'il donne est vicieuse; les gouttes d'eau qui frappent le biseau rejaillissent et se perdent en partie.



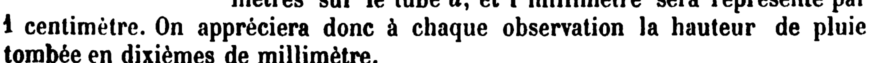
Les pluviomètres ont, en général, un diamètre de $0^{m},20$; ce diamètre doit être déterminé exactement; comme il n'est jamais régulier, il convient d'en faire plusieurs mesures et de prendre la moyenne. Si la section était trop déformée, il conviendrait d'en relever avec soin la surface, car une erreur assez faible peut se traduire en fin d'année par une hauteur d'eau notable.



Souvent l'entonnoir du pluviomètre est placé sur un édifice quelconque, et le réservoir avec son tube indicateur est à l'abri à quelques mètres de là; les deux parties de l'appareil sont alors réunies par un tube en caoutchouc vulcanisé. L'entonnoir et les tuyaux, toutes les fois qu'ils sont mouillés à nouveau, retiennent sur les petites rugosités de leur surface une certaine quantité d'eau, ce qui détermine une erreur en moins. A chaque fois, cette erreur peut atteindre une importante fraction de millimètre et, à la fin de l'année, cela peut faire 2 ou 3 centimètres.

Il est donc parfaitement inutile, dans les nombres que l'on donne, de marquer les millimètres; il faut les observer chaque jour, mais, dans le total, ne prendre que les centimètres.

L'appareil de la figure 18 ne comporte pas une grande exactitude, et n'offre pas de moyen de contrôle. On préférera, dans nombre de cas, le pluviomètre totaliseur de M. Hervé Mangon, représenté par la figure 19. C'est un entonnoir *a*, portant à sa base un robinet *b*; cet entonnoir s'adapte directement sur la virole *c*, ou bien il est mis en communication avec elle par un tube en caoutchouc. C'est dans le tube de verre *d* que l'on mesure la hauteur de pluie tombée; la section de ce tube est cinq ou dix fois moins grande que celle de l'entonnoir *a*. Supposons que l'une des sections soit la dixième partie de l'autre, 1 centimètre de hauteur de pluie sera représenté par 10 centimètres sur le tube *d*, et 1 millimètre sera représenté par 1 centimètre. On appréciera donc à chaque observation la hauteur de pluie tombée en dixièmes de millimètre.


Fig. 19.

Lorsqu'une observation est notée et inscrite, l'observateur tourne le robinet *e* et l'eau recueillie par le pluviomètre tombe dans le réservoir *f*, où elle s'emmagasine.

Ce réservoir est muni d'un robinet *g* fermé par un cadenas que l'inspecteur peut seul ouvrir; lorsque l'inspecteur vient contrôler les résultats, il mesure l'eau contenue dans le réservoir *f*, et voit si le cube est bien d'accord avec le total des hauteurs notées par l'observateur.

La proportion du dixième entre les deux sections *a* et *d* paraît trop considérable, dans la plupart des cas, parce qu'elle conduit à donner au tube en verre une trop grande longueur; on se contentera généralement de faire la section *d* quatre fois plus petite que celle qui reçoit l'eau pluviale.

Description de divers pluviomètres. — A l'Observatoire de Paris, le pluviomètre est un vase en zinc surmonté d'un entonnoir qui reçoit la pluie, et le tout est placé dans un grand pot plongé dans le sol; de sorte que l'ouverture de l'entonnoir est à $0^m,10$ seulement au-dessus du sol.

A chaque observation, l'eau recueillie est versée dans une éprouvette jaugée, et cette eau est mesurée en millimètres.

Dans les pays où l'on est exposé à des pluies torrentielles, la capacité d'un pluviomètre peut se trouver plusieurs fois remplie pendant un seul orage. Pour apprécier combien de fois la capacité se remplit, voici comment opérait M. Fabre : son récipient portait latéralement un siphon ayant son orifice au niveau du zéro, et son sommet au niveau maximum de l'eau emmagasinée; lorsque le récipient était plein, le siphon se trouvait amorcé et toute l'eau s'écoulait dans un réservoir voisin convenablement abrité. On pouvait juger de la sorte combien de fois le récipient s'était rempli.

Une cause d'erreur, qui affecte les résultats en moins, comme le font, du reste, toutes les erreurs commises sur les pluviomètres, provient de ce que lors de chaque pluie nouvelle les parois de l'appareil se lubréfient et retiennent une certaine quantité d'eau. Des expériences de M. Renou portent à $\frac{1}{8}$ de millimètre l'erreur due à cette cause chaque fois qu'elle se répète dans un pluviomètre ordinaire de $0^m,20$ de diamètre; seulement, il fait remarquer que, pendant l'été, les alternances de pluie et de soleil sont assez fréquentes, et qu'il est difficile d'apprécier combien de fois la surface mouillée se sèche d'une manière complète.

A Versailles, on a longtemps mesuré la hauteur de pluie en la recueillant et la pesant; c'est un système qui, appliqué soigneusement, peut conduire à de bons résultats.

Le pluviomètre de M. d'Abbadie se composait d'un entonnoir recevant l'eau pluviale et la conduisant dans une capsule qui basculait et se déversait toutes les fois qu'elle arrivait à contenir une quantité d'eau déterminée par l'expérience. A chaque déversement, un doigt métallique fixé à l'axe de bascule faisait avancer d'un cran une roue dentée, et, grâce à ce comptage automatique, on pouvait se dispenser d'une observation continue. Il est vrai qu'on s'expose à perdre toutes les petites pluies qui ne suffisent pas à remplir complétement la capsule, disposée de manière à basculer pour une hauteur d'un millimètre de pluie reçue par l'entonnoir.

On s'est servi encore d'un pluviomètre gyratoire, au-dessous duquel se trouvaient huit compartiments ou réservoirs correspondant chacun à une des huit principales directions de la rose des vents. La relation entre la quantité de pluie et la direction du vent s'accusait ainsi directement. Mais, cette complica-

tion est peu utile, puisque dans tous les observatoires on note la direction du vent à des périodes déterminées.

Installation des pluviomètres. — Il faut apporter le plus grand soin à l'installation des pluviomètres; c'est ce qu'on ne faisait guère autrefois, et c'est ce qui fait que les observations anciennes ne sont pas absolument dignes de confiance.

« Parmi les défauts que présente souvent l'installation des pluviomètres, dit M. l'ingénieur Lemoine dans le *Résumé des Observations de* 1869-1870, il en est un sur lequel nous ne saurions trop insister, c'est l'établissement des instruments sur les toits. Ce genre d'emplacement a été fréquemment adopté à une époque où l'on n'avait sur cette question qu'un très-petit nombre d'expériences comparatives. On peut dire d'une manière générale que, partout où un pluviomètre a été établi de cette manière, il faut en installer un à quelque distance, à peu près au niveau du sol, dans un espace bien découvert, de manière à contrôler les anciennes observations. La quantité de pluie accusée par les pluviomètres disposés sur les toits est souvent, en effet, très-inexacte. L'installation matérielle, toujours plus coûteuse, est soumise à de fréquents dérangements : les entonnoirs, qu'on ne peut pas visiter souvent, peuvent s'emplir de poussière ou de feuilles mortes : les tubes en caoutchouc dont on se sert souvent pour faire communiquer l'entonnoir au récipient se détériorent par suite de différentes causes, et donnent lieu à des fuites dont on est quelquefois longtemps à s'apercevoir. Enfin, en supposant l'instrument en parfait état, les remous peuvent changer notablement la quantité de pluie qu'il reçoit, et il est impossible d'évaluer *a priori* cette perturbation. »

A Barbarey, près Troyes, un pluviomètre, établi sur un toit près d'uu pignon, a donné du 1er janvier au 30 avril 1870, 28 millimètres de pluie; un autre, bien installé près du sol, donnait pendant le même temps 64 millimètres.

A Vauxrot, près Soissons, le pluviomètre d'un toit donnait, pendant l'année 1869, 252 millimètres, et celui du sol 452 millimètres.

On sait qu'à Paris le pluviomètre de la terrasse de l'Observatoire donne toujours des résultats inférieurs à ceux du pluviomètre de la cour.

En Angleterre, à Westminster, on obtenait en 1866 :

574	millimètres de pluie	dans le jardin de l'abbaye.
460	—	sur le toit d'une maison voisine.
307	—	sur la tour de l'abbaye.

Le colonel Ward, désireux d'éliminer l'influence des bâtiments, installa à Castle-house divers pluviomètres placés, sur des poteaux, à des hauteurs croissantes au-dessus du sol. La moyenne des observations de quatre années a donné les résultats suivants :

La quantité d'eau reçue par le pluviomètre au niveau du sol étant représentée par 10....

Le pluviomètre, situé à	0m,051	au-dessus du sol, recevait.	9,8
—	0m,152	—	9,5
—	0m,305	—	9,4
—	0m,610	—	9,3
—	0m,914	—	9,2
—	1m,523	—	9,0
—	2m,540	—	8,9
—	5m,079	—	8,8

On voit, par ces différences, combien il importe de n'admettre dans les comparaisons que des stations établies absolument dans les mêmes conditions.

Voici les prescriptions données par M. Marié-Davy dans l'*Annuaire météorologique de 1872* :

« Le pluviomètre sera placé dans un lieu bien découvert, loin des murs ou de bâtiments élevés, sans être néanmoins trop exposé au vent, et à une faible hauteur au-dessus du sol (un à deux mètres). Quand on l'établit sur des toits ou des points élevés au-dessus du sol, on recueille une quantité d'eau moindre. Si cette dernière position était commandée par l'état des lieux, elle serait consignée sur les feuilles d'observations.

« En temps de neige ou de gelée, on placera une ou deux veilleuses dans la caisse en bois de l'instrument, pour faire fondre la neige, éviter qu'elle soit entraînée par le vent et empêcher le pluviomètre de se fendre par la gelée. »

Évaluation de la neige et de la grêle.—D'après ce que nous venons de dire, la neige est mesurée comme eau, et, grâce aux veilleuses renfermées dans la caisse de l'appareil, elle fond rapidement et ne peut s'échapper.

Mais on sait que la neige fraîche obéit facilement aux moindres impulsions du vent, et qu'en outre elle tend toujours à niveler la surface du sol : un pluviomètre, placé dans le voisinage du sol, pourra donc ne recevoir que très-peu de neige. Lorsqu'il se trouve élevé d'un ou deux mètres sur un poteau, il n'en est pas de même.

Il est intéressant de connaître le poids d'une hauteur donnée de neige, ou, ce qui revient au même, le rapport entre la hauteur de neige et la hauteur d'eau qu'elle représente. Ce rapport permet, par exemple, d'évaluer la charge qu'ont à supporter les toitures couvertes de neige.

Malheureusement, c'est un rapport variable; la densité de la neige dépend de la température et de la compression qu'elle a reçue soit du vent, soit de son propre poids.

Cette densité peut varier du dixième au vingtième de celle de l'eau : la neige en flocons hexagones, tombant par un temps calme, est très-légère; la neige en flocons prismatiques se tasse au contraire davantage.

« La grêle, dit M. Renou, est généralement très-difficile à évaluer approximativement, parce qu'elle est presque toujours mêlée de pluie ; on devra principalement décrire le volume et la forme des grains, et donner une notice spéciale quand elle aura produit des dégâts ; la carte des contrées ravagées est aussi intéressante à dresser.

« La grêle est ordinairement sous forme de secteur sphérique de 5 à 10 millimètres de rayon, dans nos pays au moins. Quand elle atteint un volume plus considérable, elle est ordinairement sphérique avec une texture analogue à celle d'un artichaut ou d'une pomme de pin ; quand elle dépasse 2 ou 3 centimètres, elle offre des formes bizarres et ressemble souvent à des morceaux de glace brisée et transparente, au centre desquels on remarque un noyau rond et plus opaque.

« On remarque des transitions entre la grêle et la neige ; c'est le grésil, qui est ordinairement en petites pelotes légères, mais dans lequel on reconnait souvent la forme de secteur sphérique ou celle d'une étoile à six branches. »

On sait combien les grêles entraînent de désastres pour l'agriculture ; l'étude de la marche de ce phénomène offre donc un puissant intérêt. Il importe de dresser avec soin la carte des orages chargés de grêles, afin d'arriver à reconnaître les lois auxquelles ils peuvent obéir. Mais il faut faire attention aux do-

cuments dont on se sert à ce sujet : ainsi, beaucoup de cartes d'orages dressées jusqu'à ce jour indiquent que les grêles évitent les forêts et les pays pauvres. Comme le fait remarquer M. Cézanne, on ne note pas les grêles qui atteignent les forêts parce qu'elles n'y causent pas de dommages; on relève avec soin les grêles qui ravagent les riches vignobles de la Gironde, tandis que celles qui se déchaînent sur les Landes passent inaperçues.

Rosée et brouillards. — Il est difficile d'évaluer exactement la rosée, car la quantité qu'on peut en recueillir dépend beaucoup de la nature de la surface sur laquelle elle se dépose.

En étendant sur le sol une étoffe imperméable posée avec soin et la pesant à nouveau le lendemain, la différence de poids permettra de conclure le poids de rosée qui se serait deposé sur un mètre carré de l'étoffe employée. Mais ce nombre n'offre pas grand intérêt, car il ne serait pas le même sur une autre surface, et, ce qu'il importe de connaître au point de vue agricole, c'est la quantité de rosée que recueillent les terres ou les plantes.

La rosée est un phénomène physique bien simple :

Lorsque, par une gelée d'hiver, vous vous tenez dans une pièce chauffée, vous voyez les vitres se recouvrir de buée ou de vapeur d'eau condensée. L'air intérieur de la pièce se trouve à une température notablement plus élevée que celle de l'air extérieur; au contact des vitres froides, il se refroidit lui-même, et la vapeur d'eau dont il est chargé finit par atteindre et même par dépasser son point de saturation : elle se condense et se dépose à l'état liquide; les vitres se recouvrent d'une buée qui ne tarde pas à ruisseler.

Le pouvoir absorbant et émissif des terres est bien supérieur à celui des gaz et en particulier à celui de l'air : sous les rayons du soleil, l'air s'échauffe beaucoup plus lentement que le sol; au contraire, ce dernier se refroidit beaucoup plus vite pendant la nuit.

Tant que le soleil est sur l'horizon, la rosée ne saurait se produire; mais, dans la seconde partie de la nuit, à l'approche du matin, lorsque la température descend à son minimum, la croûte du sol et les plantes qui la recouvrent sont beaucoup plus froides que l'air qui les touche; celui-ci arrive à la sursaturation et dépose à l'état liquide une partie de sa vapeur d'eau. Ainsi que nous l'avons vu, deux thermomètres placés, l'un sur le sol, l'autre à un mètre au-dessus, pendant une belle nuit de printemps, peuvent présenter entre eux une différence de plusieurs degrés. Cette différence peut même être assez forte pour que le point de congélation de l'eau soit atteint dans le voisinage du sol; la rosée passe alors à l'état solide et devient *gelée blanche.*

Les gelées blanches du printemps, qui se produisent à l'époque de la lune rousse, sont particulièrement dangereuses pour les récoltes.

Toutes les causes qui empêchent le refroidissement du sol et son rayonnement vers les espaces célestes, s'opposent à la formation de la rosée. Il n'y a pas de rosée sur le sol recouvert d'un abri, il n'y en a pas pendant les nuits noires, où le ciel reste couvert de nuages; il n'y en a pas non plus lorsque règne un vent fort qui ne laisse pas à l'air en contact avec le sol le temps de se refroidir.

Les brouillards sont dus aux vapeurs qui s'échappent des couches échauffées du sol et qui pénètrent dans un air plus froid déjà saturé; la vapeur d'eau passe à l'état vésiculaire; elle devient apparente comme un nuage; lorsque cette vapeur augmente et que l'air ne peut la soutenir, elle se condense et retombe sur le sol en pluie fine. D'autres fois, lorsque paraît un brûlant soleil, cette vapeur

d'eau s'élève dans l'atmosphère qui semble la dévorer ; c'est qu'elle rencontre des couches non saturées et passe alors à l'état de gaz transparent.

En général, les brouillards indiquent l'existence de nappes d'eau souterraines; ils se développent surtout dans les vallées, sur les terrains humides ; nous avons vu que les variations de température pénétraient fort lentement dans le sol ; quand arrive l'automne, les couches les plus voisines de la surface, ainsi que l'eau qui les imbibe, restent pendant la nuit à une température bien supérieure à celle de l'air : d'où une évaporation active qui se manifeste par des brouillards.

Les eaux souterraines, les sources notamment, sont toujours marquées par des brouillards : ces eaux sont, en effet, plus chaudes que l'atmosphère du matin. Les anciens aquilèges, suivant Pline, découvraient les sources en observant au lever du soleil les dépressions du sol ; là où s'élevait une colonne de vapeur, ils creusaient le sol et avaient chance en effet de rencontrer des sources ou des suintements.

Les brouillards ne s'évaluent que par comparaison, par la distance à laquelle ils permettent de voir un objet déterminé.

QUANTITÉS DE PLUIE QUI TOMBENT EN DIVERS LIEUX DU GLOBE

Observations anciennes à l'Observatoire de Paris. — Ce n'est guère qu'au commencement du dix-huitième siècle qu'on eut l'idée d'observer les hauteurs de pluie qui tombent en un pays déterminé. Les anciennes observations isolées ne paraissent pas, en général, mériter grande confiance, et cela se conçoit si l'on réfléchit aux nombreuses causes d'erreur en moins qui peuvent se présenter, à commencer par les oublis de l'observateur lui-même ; nous avons eu l'occasion de comparer aux résultats actuels ceux qu'avait trouvés, de 1748 à 1778, le naturaliste Duhamel du Montceau ; d'après lui, la hauteur d'eau moyenne qui tombe sur le plateau de Beauce serait de $0^m,48$, tandis qu'actuellement elle est voisine de $0^m,60$; le pluviomètre dont il se servait était donc mal installé ou les observations péchaient par exactitude.

A Paris, les observations étaient sans doute plus exactes et plus régulières ; cependant elles laissaient encore à désirer. Philippe de la Hire les commença en 1689. Jusqu'en 1803, le pluviomètre était placé sur une tour et était réuni à son récipient par un tuyau de 21 mètres de long.

En 1803, on installa sur la tour, à 28 mètres au-dessus du sol, un pluviomètre qui fonctionne encore aujourd'hui ; c'est un cylindre de $0^m,10$ de hauteur et de $0^m,76$ de largeur ; la quantité de pluie se mesure avec des éprouvettes jaugées.

En 1817, on installa dans la cour, à 2 mètres au-dessus du sol, un autre appareil qui donne des résultats différents de ceux qui sont fournis par l'appareil de la tour. Depuis 1854, le pluviomètre de la cour, abrité par des peupliers sans cesse grandissants, a reçu des quantités d'eau décroissantes.

Le fonctionnement de l'appareil installé sur la terrasse de la tour a toujours été plus régulier et plus uniforme ; ses indications méritent donc confiance, bien qu'elles soient un peu faibles à cause de la position élevée du lieu d'observation.

Le rapport entre les quantités de pluie reçues par l'appareil de la cour et celui de la terrasse a été en moyenne de :

1,13 pour quarante années, de 1817 à 1848 et de 1856 à 1864.
1,09 pour douze années, de 1856 à 1860.
1,04 pour l'année 1870-1871.

Les hauteurs de pluie tombées chaque année sur la terrasse de l'Observatoire de Paris depuis 1689 sont indiquées au tableau suivant extrait de l'*Annuaire météorologique*.

		Millimètres.
De 1689 à 1717	moyenne..........	502,0
1718 à 1747	—	387,8
1748 à 1754	—	503,9
1773 à 1788	—	535,5
1789 à 1797	—	424,2
1804 à 1818	—	501,9
1819 à 1848	—	511,2
1849 à 1872	—	520,7

Et voici les hauteurs de pluie annuelles depuis 1804 jusqu'à 1874 :

ANNÉES.	MILLIMÈT.	ANNÉES.	MILLIMÈT.	ANNÉES.	MILLIMÈT.	ANNÉES.	MILLIMÈT.	ANNÉES.	MILLIMÈT.
1804	703	1819	615	1834	421	1849	597	1834	366
1805	530	1820	379	1835	438	1850	563	1865	542
1806	489	1821	584	1836	611	1851	469	1866	644
1807	473	1822	424	1837	528	1852	597	1867	565
1808	435	1823	457	1838	542	1853	454	1868	513
1809	490	1824	572	1839	580	1854	614	1869	477
1810	437	1825	469	1840	455	1855	344	1870	418
1811	598	1826	410	1841	527	1856	565	1871	524
1812	497	1827	501	1842	342	1857	492	1872	687
1813	502	1828	585	1843	542	1858	466	1873	
1814	382	1829	560	1844	571	1859	545		
1815	450	1830	573	1845	582	1860	655		
1816	546	1831	529	1846	565	1861	458		
1817	565	1832	466	1847	430	1862	516		
1818	432	1833	503	1848	575	1863	427		

Le tableau suivant donne la répartition moyenne des pluies dans les divers mois de l'année :

ANNÉES.	OCTOBRE.	NOVEMBRE.	DÉCEMBRE.	JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.
1804 à 1818	45,8	44,3	42,7	36,5	33,1	31,5	32,0	43.3	45,8	51,7	50,6	44,2
1819 à 1848	41,9	47,0	35,2	32,9	33,7	32,1	40,9	49,9	48,6	48,0	47,1	53,7
1849 à 1872	50,9	37,3	35,0	38,1	22,1	33,8	38,4	53,2	53,9	54,6	48,1	48,7

Depuis l'an 1689, l'année qui a reçu la plus grande hauteur de pluie (d'après les observations de la terrasse de l'Observatoire) est 1804, où l'on a recueilli

703 millimètres d'eau, et l'année la moins pluvieuse est 1733, où l'on n'a recueilli que 210 millimètres d'eau.

Régime de la pluie dans le bassin de la Seine. — Le régime de la pluie dans le bassin de la Seine a été étudié avec le plus grand soin par M. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées, qui s'est adjoint dans ces dernières années M. l'ingénieur Lemoine.

On trouvera le résultat détaillé de leurs intéressantes études dans l'ouvrage intitulé : *la Seine, études hydrologiques*, par M. Belgrand, et dans le *Résumé des observations centralisées* du service hydrométrique du bassin de la Seine, que rédige chaque année M. Lemoine.

Sans entrer dans les détails, nous donnerons ici les caractères principaux du régime de la pluie dans le bassin de la Seine.

Voici d'abord les hauteurs de pluie moyennes annuelles, mises en regard du nom des localités et de l'altitude du pluviomètre :

STATION.	ALTITUDE EN MÈTRES.	HAUTEUR DE PLUIE EN MILLIMÈT.
BASSIN DE L'YONNE.		
Les Settons (Morvan).	596	1750
Château Chinon. . . .	557	1143
Saulieu.	539	1014
Pouilly (Côte-d'Or). . .	395	721
Thenissey (Côte-d'Or).	300	786
Auxerre.	122	682
Tonnerre.	140	700
Joigny.	82	618
Sens.	82	626
BASSIN DE L'AISNE.		
Sainte-Ménehould. . .	145	639
Montagne voisine de Sainte-Menehould. .	181	751
Reims.	81	470
Soissons.	51	462
BASSIN DE L'OISE.		
Hirson (Ardennes). . .	196	768
Laon.	186	654
Beauvais.	79	559
Pontoise.	33	501
BASSIN DE LA MARNE.		
Langres, vallée. . . .	339	1006
Langres, plateau. . .	469	879
Chaumont, plateau. .	330	966
Chaumont, vallée. . .	256	920
Vassy	183	765
Bar-le-Duc.	198	861
Vitry-le-Français. . .	107	664
BASSIN DE LA SEINE.		
Chanceaux (Côte-d'Or).	465	960
Châtillon-sur-Seine. .	225	712
Bar-sur-Seine.	157	917
Barberey (Aube). . .	97	444
Melun.	49	457
Paris.	»	556
Rouen.	43	793
Fatouville, Le Havre. .	89	924

Nous ne reproduisons pas les nombres donnés pour un grand nombre de stations, parce qu'ils ne se rapportent qu'à deux ou trois années et, par conséquent, ne sont pas comparables aux autres. Il faut remarquer aussi que tous les pluviomètres ne se trouvent pas dans des conditions identiques et qu'il y a lieu de réviser l'installation de beaucoup de ces appareils.

Le bassin de la Seine est tout entier soumis aux mêmes influences météorologiques ; lorsque le temps est pluvieux, la pluie tombe depuis le Morvan jusqu'à la mer ; si la sécheresse s'établit, elle règne à la fois sur toute l'étendue du bassin.

Les quantités de pluie dépendent de trois influences particulières : le voisinage de la mer, l'altitude, les accidents topographiques.

Ce sont les vents soufflant de la mer qui amènent la pluie ; ils se refroidissent

au premier contact des côtes et les arrosent abondamment : la hauteur de pluie annuelle va donc en décroissant à mesure qu'on s'éloigne de la Manche ; il y a un maximum sur la côte, au Havre, par exemple, et la hauteur décroît si l'on remonte vers Rouen et Paris.

Exemple pour l'année 1873 (observations de M. l'ingénieur Cohen) :

Rouen.	altitude,	8	mètres, reçoit	609	millimètres de pluie.
Caudebec..	—	12	—	746	—
Yvetot.	—	151	—	865	—
Fatouville, près Honfleur	—	95	—	760	—
Le Havre (Sanvic).. . .	—	89	—	857	—
Paris (Panthéon). . . .	—	»	—	555	—

La quantité de pluie croît aussi avec l'altitude ; sur les sommets du Morvan, on trouve un maximum pour la hauteur annuelle ; cette hauteur diminue à mesure qu'on descend vers les plaines de la partie centrale du bassin, dans le voisinage de Paris ; au delà, l'influence du voisinage de la mer se fait sentir, les nombres se relèvent, et on retrouve au Havre un nouveau maximum. Ainsi, il existe un maximum aux deux extrémités du bassin et la région centrale présente un minimum.

En 1873, la cime la plus élevée du Morvan, le Haut-Folin, à 902 mètres audessus du niveau de la mer, a reçu 2140 millimètres de pluie.

Le Bas-Folin..	altitude,	800	mètres, a reçu	1928	millimètres.
Les Settons.	—	596	—	1602	—
Saulieu.	—	539	—	1135	—
Langres (vallée).	—	339	—	824	—
Paris (Ménilmontant)..	—	109	—	647	—
Paris, moyenne de huit stations	—	»	—	605	—
Étampes.	—	80	—	490	—
Compiègne.	—	41	—	524	—

La région de pluie minima paraît se trouver sur le plateau de la Beauce ; le plateau de la Brie, plus élevé, est mieux partagé en pluie.

Si l'on construit une courbe ayant pour abscisses les altitudes des points considérés et pour ordonnées les hauteurs de pluie correspondantes, on reconnaît que cette courbe ne prend pas une forme régulière ; autrement dit, il est impossible d'établir une formule qui, étant connue la hauteur d'eau à une station d'altitude donnée, permette de calculer la hauteur d'eau à une autre altitude.

C'est qu'en effet l'influence de l'altitude est fréquemment masquée et absorbée par les influences locales dues à la configuration du pays et à la manière dont il est exposé aux vents pluvieux.

Cette influence de l'orientation par rapport aux vents pluvieux est très-sensible dans le massif du Morvan : les versants inclinés à l'ouest et au sud-ouest reçoivent le choc des vents humides ; par le refroidissement et la compression qui en résultent, l'eau des nuages passe de l'état de vapeur à l'état liquide et tombe sur le sol. Au contraire, sur le versant opposé, les vents s'étendent librement ; ils sont du reste moins saturés, et il arrive que des localités situées à la même altitude, l'une sur un versant, l'autre sur le versant opposé, reçoivent des quantités de pluie très-différentes.

Influence des obstacles opposés aux vents pluvieux et de la topogra-

phie. — « Les obstacles opposés au vent ont, dit M. Cézanne dans son livre si intéressant sur les torrents des Alpes, une influence majeure sur le phénomène de la pluie.

Lorsque le vent pluvial rencontre une éminence qui l'oblige à s'élever, un double effet se produit : l'ascension de l'air amène par elle-même un refroidissement et, par suite, une condensation de vapeur ; mais, en outre, le courant atmosphérique, dévié de sa direction, subit un frottement contre la surface refroidie de la terre et la pluie est, comme on l'a dit, mécaniquement exprimée des nuages. Pour ces raisons, il pleut davantage sur les caps que sur les côtes ouvertes ; mais, dans les *fiords* profonds de la Norvége, le vent pluvial, brusquement arrêté par une muraille de rocher, dépose un maximum de pluie. »

Ainsi, il ne faut pas faire de l'influence de l'altitude une loi absolue, car, si elle est vraie sur un seul versant, toutes choses sensiblement égales d'ailleurs, elle ne l'est plus lorsqu'il s'agit de points qui ne reçoivent pas les vents pluvieux sous la même incidence.

C'est ce que M. Cézanne va nous faire bien nettement comprendre en quelques phrases d'un style clair et imagé :

« Du sommet élevé d'une montagne au-dessus de laquelle, dans un ciel pur, brille le soleil, on aperçoit quelquefois sous ses pieds une marée de nuages qui monte sur l'un des versants ; elle pousse dans toutes les anfractuosités des gorges ses vagues mobiles, assaillant et surmontant les contre-forts qui l'arrêtent, tout comme l'Océan couvre d'écumes la tête noire des récifs. Par tous les cols, par toutes les dépressions de la chaîne, les flots nuageux se pressent et s'épanchent sur le versant opposé : les hauts sommets émergent seuls au-dessus de l'inondation, mais, vers l'aval, les nuages semblent tomber dans un vide insondable ; ils disparaissent et l'un des versants, doré par le soleil, fait un riant contraste avec l'autre qui, trempé par l'orage, est enseveli sous un voile épais. La pluie est alors invisible pour l'observateur, mais il la reconnaît plus tard lorsque dans sa descente il pénètre dans les nuages, ou même, si l'orage est dissipé, lorsqu'il trouve sur sa route tous les ruisseaux débordés.

Lorsqu'on domine ainsi les nuages, on peut voir le courant atmosphérique obéir aux lois de l'hydraulique. Il a ses rapides et ses remous ; il s'acharne contre les saillies, mais, lorsqu'il est contenu entre des berges régulières, il se presse contre la rive concave et délaisse la rive convexe. Il n'est pas douteux que toutes ces circonstances ne fussent indiquées par les pluviomètres, s'il était possible d'en placer un grand nombre dans une gorge de montagne. »

Nous verrons plus loin quelques exemples de l'influence du relief d'un pays sur la hauteur de pluie qu'il reçoit.

Sans sortir du bassin de la Seine et des observations de M. Belgrand, on trouve que, en l'année 1862-1863, la quantité de pluie reçue par la vallée d'Yonne a été supérieure aux quantités reçues par les vallées de l'Oise et de la Seine. C'est qu'en effet les vents pluvieux ont presque constamment suivi la vallée de l'Yonne ; le courant aérien s'est développé sans obstacle dans cette vallée qui lui a servi de thalweg et de lit. Généralement, la vallée de l'Oise se trouve protégée et les courants humides suivent de préférence les vallées de l'Yonne et de la Seine.

On comprend sans peine qu'un courant qui coupe obliquement une vallée n'y exerce qu'une action amoindrie, car, en vertu de sa vitesse acquise dans le sens horizontal, il tend à franchir la dépression sans descendre jusqu'au fond.

L'influence de la direction relative des vents et des versants se fait sentir à

Paris ; les vents pluvieux enfilent la dépression de la Villette, à l'est de la butte Montmartre, de sorte que le rapport des hauteurs de pluie à l'est et à l'ouest de la butte est comme 1,1 à 0,9.

Influence de la nature du terrain. — La longue dépression de la Champagne humide est accusée par une abondance relative de pluies.

M. l'ingénieur Fournié en a vu la cause dans l'imperméabilité du sol : tout pays imperméable et peu incliné est par cela même humide et souvent même marécageux ; la terre n'a donc pas besoin de soutirer à l'air l'humidité qu'il renferme. Au contraire, un sol perméable, comme le calcaire de Beauce, est forcé de demander à la vapeur d'eau de l'air l'humidité qui lui manque, et cela se fait aux dépens de la hauteur de pluie.

Cette explication paraît jusqu'à présent plus ingénieuse que vraie.

« Voici, dit M. Belgrand, l'explication qui me paraît la plus rationnelle et peut-être la plus générale. Les masses d'air en mouvement suivent, comme les liquides en se déplaçant, les chemins où elles trouvent le moins de résistance, le moins de frottement, c'est-à-dire les lignes de thalweg.

« Dans un fleuve débordé qui couvre toute une vallée, pour une section donnée il passe beaucoup plus d'eau au-dessus du thalweg que sur les rives, parce que la vitesse d'écoulement y est plus grande. Il en est de même dans le mouvement des vents pluvieux. Il passe plus d'air, dans un temps donné, entre deux lignes verticales équidistantes au-dessus d'une vallée que sur les plateaux voisins ; les nuages sont entraînés dans le même chemin par cette accélération de vitesse et il tombe une plus grande quantité de pluie.

« Les vents pluvieux du sud-ouest suivent donc naturellement la dépression de la Champagne humide. »

Rapport des quantités de pluie dans les localités voisines. — M. l'ingénieur Fournié avait reconnu que les hauteurs de pluie qui tombent pendant plusieurs années successives en deux points différents demeurent proportionnelles.

C'est-à-dire que si l'on désigne par :

H H′ H″ ... les hauteurs de pluie qui tombent en un lieu A pendant une série d'années ;

h h′ h″ ... les hauteurs de pluie qui tombent en un lieu B pendant la même série, on a la relation :

$$\frac{H}{h}=\frac{H'}{h'}=\frac{H''}{h''}\cdots\cdots$$

Cette loi n'est malheureusement pas exacte ; elle serait bien précieuse puisqu'elle permettrait de déduire d'une seule observation bien faite des nombres exacts pour une grande quantité de stations.

Cependant, lorsqu'on l'applique à des points rapprochés, on reconnaît qu'elle ne s'éloigne pas trop de la vérité, et elle peut en somme rendre des services, pourvu qu'on considère des points situés dans la même vallée.

Nous trouvons dans le résumé des observations hydrologiques de 1873, par M. l'ingénieur Lemoine, les nombres suivants, qui montrent bien que la loi n'est pas absolue, mais que néanmoins elle n'est pas sans fondement :

BASSIN DE L'YONNE. — RAPPORTS DES HAUTEURS DE PLUIE DE QUELQUES STATIONS DU BASSIN DE L'YONNE A CELLE DES SETTONS, PRISE CHAQUE ANNÉE POUR UNITÉ.

	1873	1872	1871	1870	1869	1868	1867	1866	1865	1864
Château-Chinon (Nièvre). . .	0,60	0,61	0,69	0,56	0,52	0,55	0,63	0,60	0,61	0,58
Saulieu (Côte-d'Or)..	0,70	0,53	0,43	0,34	0,38	0,50	0,55	0,55	0,53	0,51
Pouilly —	0,47	0,46	0,42	0,35	0,34	0,37	0,45	0,37	0,42	0,44
Grosbois —	0,57	0,54	0,43	0,42	0,39	0,41	0,47	0,36	0,49	0,48
La Colancelle (Nièvre).. . .	0,55	0,51	0,49	0,47	0,40	0,45	0,49	0,40	0,48	0,50
Pannetière (Nièvre).	0,59	0,58	0,58	0,55	0,49	0,50	0,51	0,44	0,43	0,51

RAPPORTS DES HAUTEURS DE PLUIE DE QUELQUES STATIONS DU BASSIN DE LA SEINE A CELLES DE PARIS PRISES CHAQUE ANNÉE POUR UNITÉ.

	1873	1872	1871	1870	1869	1868	1867	1866	1865	1864
Beauvais.	1,02	1,10	1,14	1,62	1,08	1,07	0,92	0,93	1,13	1,41
Pontoise.	0,93	0,93	0,92	1,07	0,79	0,84	0,96	0,90	0,91	1,15
Rouen.	1,00	1,22	1,38	1,62	1,52	1,27	1,29	1,24	1,30	1,48
Fatouville (près Honfleur). .	1,27	1,40	1,58	1,80	1,45	1,37	1,51	1,48	1,50	1,59

HAUTEURS DE PLUIE QUI TOMBENT EN DIVERS POINTS DE L'EUROPE.

Les observations pluviométriques exactes et comparables entre elles ne remontent qu'à quelques années. Aussi, bien qu'on dispose de beaucoup de chiffres s'appliquant aux diverses régions de l'Europe, on ne peut avoir en eux une grande confiance. Nous citerons donc un peu au hasard les résultats consignés dans les divers ouvrages de météorologie, en indiquant sommairement les causes des variations lorsqu'elles seront bien apparentes.

Pluies aux divers points de la France. — M. Martins a divisé la France en cinq climats, qui sont :

Le climat Séquanien, bassin de la Seine.
— Vosgien, bassin du Rhin et de la Moselle.
— Rhodanien, bassin du Rhône, au-dessus de Lyon.
— Girondin, bassin de la Gironde.
— Méditerranéen, bords de la Méditerranée

Voici la distribution des pluies dans ces divers climats:

CLIMATS.	PLUIES (millimètres.)	PROPORTION POUR CENT PENDANT				NOMBRE DE JOURS DE PLUIE.
		L'HIVER.	LE PRINTEMPS.	L'ÉTÉ.	L'AUTOMNE.	
Séquanien......	548	21	22	30	27	140
Vosgien,......	669	19	23	31	27	137
Rhodanien.....	946	20	24	23	33	107
Girondin......	586	25	21	23	33	130
Méditerranéen...	651	25	24	11	40	53

Ainsi les saisons où il tombe la plus grande hauteur de pluie sont : l'été, pour les climats séquanien et vosgien; l'automne, pour les climats méditerranéen et girondin; le printemps et l'été sont des saisons relativement sèches.

Le climat rhodanien est intermédiaire. Aussi, les deux climats du sud, a été sec, sont-ils essentiellement vinicoles; vient ensuite le climat rhodanien, puis, au dernier rang, les climats du nord.

Ainsi, le climat séquanien est nettement différencié du climat méditerranéen par ce fait que l'été de celui-ci est la saison qui donne le moins de pluie, tandis que l'été de celui-là est la saison qui donne le plus de pluie.

Au grand Saint-Bernard, le climat méditerranéen règne déjà; la pluie d'été n'est que les deux tiers de la pluie du printemps.

A mesure qu'on descend vers la Méditerranée, la pénurie des pluies d'été s'accentue : à Briançon, la pluie du printemps est le double de la pluie d'été, et il en est de même de la pluie d'automne.

Dès qu'on dépasse le confluent du Rhône et de l'Isère, le climat méditerranéen se fait sentir, ainsi que le montre M. Raulin, professeur à la faculté de Bordeaux.

« A Valence, à Viviers, à Orange, à Avignon, dit M. Raulin, les pluies de printemps, encore prédominantes, sont de beaucoup dépassées par celles d'automne.

« Sur le littoral, de Marseille à Toulon, Hyères et Gênes, les pluies de printemps sont souvent inférieures à celles d'hiver, dont la quantité est souvent dépassée par celle des pluies d'automne.

« Le régime méditerranéen, ainsi caractérisé, franchit l'Apennin et s'étend dans dans la partie méridionale de la plaine du Pô, à Parme et à Guastalla ; mais à Bologne déjà et dans la partie septentrionale, à Padoue et Milan, ainsi que dans le Piémont, à Turin et à Yvrée, on retrouve le régime septentrional, caractérisé là, comme à Genève, par une augmentation constante de la quantité de pluie de l'hiver à l'automne. »

La loi d'accroissement des hauteurs de pluie annuelles avec l'altitude, se vérifie sensiblement lorsqu'on s'élève sur des chaînes exposées aux vents pluvieux, mais l'influence de l'altitude est peu de chose comparée à celle des obstacles que les vents pluvieux rencontrent dans leur course.

Dans le bassin de la Seine, l'influence de l'altitude paraît nettement accusée, parce que les vents pluvieux rencontrent des obstacles toujours plus considérables à mesure qu'ils se rapprochent de la ligne de faîte; cependant, nous

avons vu que la quantité d'eau était plus considérable aux Settons, fond de la vallée de la Cure, qu'à Château-Chinon, située sur un plateau découvert qui laisse passer librement les vents pluvieux.

L'influence des obstacles résulte encore des nombres ci-après, que nous trouvons dans le *Traité d'hydraulique* de M. Duponchel.

Dans la Lozère, pendant une période de dix mois, il est tombé les hauteurs de pluie suivantes :

A Villefort.	altitude	580	mètres,	1741	millimètres.
Saint-Germain de Calberte.	—	450	—	1398	—
Montmirat.	—	1030	—	455	—
Marvejols.	—	640	—	432	—
Mende.	—	720	—	466	—

La loi de l'altitude est complétement masquée ; c'est que Villefort et Saint-Germain sont situées dans des vallons étroits, voisins de la ligne de faîte, enfilés par les vents pluvieux ; Montmirat se trouve sur un plateau élevé et découvert, Marvejols et Mende sont situées dans des vallons éloignés de la ligne de faîte et abrités.

Les vents pluvieux du climat méditerranéen soufflent de l'est ou du sud-est. D'après M. Cézanne, il tombe annuellement :

A Marseille.	512	millimètres de pluie.
Toulon.	505	—
Nîmes.	640	—
Montpellier..	770	—
Viviers.	900	—
Joyeuse..	1300	—

Viviers est au pied de la muraille des Cévennes, assaillie perpendiculairement par les vents pluvieux, et Joyeuse est au fond d'une vallée sur laquelle le courant se brise.

« On ne saurait contester, dit M. l'ingénieur Duponchel, que sur les flancs et dans les vallées des montagnes qui surgissent brusquement au-dessus des plaines, la quantité d'eau pluviale n'aille en augmentant très-rapidement. A Bigorre et à Sarrancolin, au pied des Pyrénées, elle est à peu près deux fois plus forte qu'à Agen, au centre de la vallée de la Garonne. Elle doit être bien plus grande encore dans les hautes vallées de la montagne qui pénètrent dans la région des nuages. Les observations, continuées à Sarrancolin sur le débit de la Neste pendant une période de neuf ans, accusent un cube moyen de $35^{m},50$ par seconde. Comparée à la superficie d'un bassin qui ne dépasse pas 57 000 hectares, ce débit représente l'écoulement annuel d'une tranche de près de 2 mètres de hauteur à laquelle il faudrait ajouter, pour avoir l'eau pluviale, celle qui est absorbée par l'évaporation ou les infiltrations artésiennes dans les couches inférieures du sol. La tranche d'eau pluviale à Sarrancolin ne dépassant pas $1^{m},40$, il faut admettre des hauteurs de 3 à 4 mètres dans les régions les plus élevées des Pyrénées. »

Des résultats analogues ont été constatés sur les affluents du Pô à leur sortie des Alpes.

Les nombres recueillis par M. Léveillé sur la région du Jura confirment les résultats précédents :

A Pierre-Châtel. . .	altitude	161	mètres, il tombe	1260	millimètres de pluie.
Varambon.	—	233	—	1112	—
Saint-Rambert. . .	—	310	—	1592	—
Syam.	—	365	—	1741	—
Saint-Claude. . .	—	444	—	1458	—
Pontarlier.	—	840	—	970	—
Fort Dejoux. . . .	—	1001	—	1177	—
Saint-Cergues . .	—	1045	—	1560	—

Le pluviomètre du couvent du grand Saint-Bernard, altitude 2620 mètres, recueille annuellement 1500 millimètres d'eau.

« Si le pluviomètre le plus élevé de l'Europe, dit M. Cézanne, est en même temps l'un des plus riches, la cause en est peut-être moins à son altitude qu'à sa position topographique. L'instrument est placé dans une étroite embrasure dominée par les glaces et dans laquelle les vents, de quelque côté qu'ils viennent, doivent passer avec violence et se refroidir brusquement. »

Les villes placées dans les vallées voisines reçoivent par année : Milan, 0m,96 de pluie; Berne, 1m,14 et Genève, 0m,75.

M. l'ingénieur en chef Lamairesse, dans ses études hydrologiques sur *le Jura*, a donné les nombres suivants :

Région de la Serre, Gray et Dôle, hauteur de pluie annuelle, 0m,789.

Le *Vignoble*, longue bande de 11 kilomètres de largeur moyenne, s'étend entre Baume-les-Dames et Ceysériat, à un myriamètre de Bourg; l'altitude varie de 250 à 400 mètres et la hauteur annuelle de pluie, d'après les observations faites à Lons-le-Saulnier, s'élève à 1237 millimètres. La plus forte averse a donné, en vingt-quatre heures, 0m,061. « Cette grande quantité d'eau pluviale peut être attribuée, dit M. Lamairesse, partie à la grande évaporation qui doit avoir lieu nécessairement à la surface de la formation marneuse remplie de sources et de suintements qui constitue le Vignoble, partie au refroidissement et au brisement contre le premier plateau des nuages qui, après s'être élevés du sein des terrains imperméables, notamment de ceux de la Dombe, ont été poussés vers le nord par le courant des vents qui, depuis la mer, remonte la vallée du Rhône d'abord et ensuite celle de la Saône. »

Le *premier plateau* s'étend du nord au midi, sur une largeur de 97 kilomètres; c'est une longue cuvette divisée en un grand nombre de compartiments, et dont le bord oriental est très-élevé au-dessus du fond, tandis que le bord occidental l'est très-peu, quoiqu'il domine la plaine d'une grande hauteur. L'altitude du premier plateau varie de 400 à 600 mètres, et la hauteur moyenne de pluie est à peu près celle qu'on observe à Poligny, soit 1m,40.

Le *deuxième plateau* monte jusqu'à l'altitude de 900 mètres. La hauteur annuelle de pluie est dans la partie moyenne, à Saint-Claude, de 1m,46 et de 1m,77 à Syam.

Le *troisième plateau* comprend les cimes les plus élevées du Jura; il est caractérisé par l'absence des céréales, la prédominance des forêts d'épicéa et le développement des tourbières; au delà de 1500 à 1600 mètres, il ne reste que les pâturages. La hauteur moyenne de pluie a été trouvée de 0m,934 aux forts de Joux et des Rousses, « d'où l'on voit qu'il pleut beaucoup moins sur les hauts sommets du Jura que sur les rampes. »

Sur les rampes, les courants atmosphériques, chargés de pluie, abandonnen par le choc la plus grande partie de l'eau qu'ils renferment; ils arrivent vers les sommets, relativement moins chargés, et de plus rencontrent moins d'obstacles dans leur course.

Les vents qui amènent la pluie sont ceux qui viennent de la mer; lorsqu'ils rencontrent une chaîne de montagnes, ils se brisent contre le versant qu'ils rencontrent, mais l'autre versant est protégé et ne reçoit rien.

Lorsque les vents pluvieux enfilent une vallée et la remontent, la quantité d'eau tombée va généralement en s'accroissant à mesure qu'on s'élève, et, si la vallée se termine par des parois à pic, c'est là qu'on trouve le maximum de pluie.

Mais si une vallée est placée transversalement aux courants pluvieux, et qu'elle ne soit pas large, les vents passent par-dessus en vertu de leur vitesse acquise; elle est relativement épargnée par la pluie; le versant opposé à la direction du vent pluvieux est seul frappé, et si la largeur de la vallée vient à augmenter, il peut recevoir de grandes quantités d'eau.

Il y a de ces faits des exemples bien connus :

Quant il pleut à Narbonne, dit M. Cezanne, le soleil luit à Montauban. C'est le vent d'est qui amène à Narbonne les nuages humides et ceux-ci se brisent contre les Corbières et les Cévennes, Montauban est protégé. — Au contraire c'est le vent d'ouest qui amène la pluie à Montauban, et Narbonne se trouve à son tour protégé.

La vallée de la Durance, abritée des vents d'est et de sud-est qui soufflent de la mer, échappe aux courants humides et reçoit relativement peu de pluie.

L'influence exercée par les obstacles sur la répartition des pluies ressort encore bien clairement des lignes suivantes que nous empruntons à la météorologie nautique de MM. Ploix et Caspari, ingénieurs hydrographes :

« Les chaînes de montagnes, dont les sommets ont une température d'autant plus basse qu'ils sont plus élevés, condensent rapidement les vapeurs des vents qui les frappent. C'est pour cela que les sommets élevés sont toujours couverts de nuages et de neiges éternelles.

C'est probablement à une action de refroidissement analogue exercée sur l'atmosphère que sont dues ces splendides piles de nuages en forme de cumuli qui étagent leurs masses imposantes au-dessus des îles de l'océan Pacifique, non seulement lorsqu'elles sont élevées et montagneuses, mais même lorsqu'elles sont basses, même lorsqu'elles ne sont que de simples îles de corail, ou, ce qui est plus remarquable encore, lorsqu'elles sont cachées sous l'eau et ne forment qu'un véritable récif. Il semble que ces nuages aient été suspendus au-dessus de ces dangers, comme un phare destiné à prévenir le navigateur du péril qu'aucun autre indice ne lui signalerait peut-être, et au-dessus des îles pour favoriser leur végétation par les pluies abondantes qui en tombent.

Des deux versants d'une chaîne de montagnes, l'un est généralement pluvieux et l'autre sec; celui qui est au vent condense la vapeur et en est inondé; le versant de l'autre côté reçoit le vent quand il est déjà dépouillé de son humidité et devenu sec. Plus les montagnes seront élevées, plus le vent sera sec après les avoir traversées. Ainsi, il ne suffit pas qu'un vent vienne de l'équateur pour être humide, il faut encore qu'il ait conservé sa vapeur d'eau.

Que se passe-t-il, par exemple, dans l'Inde, exposée aux moussons alternatives de S. O. et de N. E. ? D'octobre en avril règnent les alizés de N. E.; ils traversent le golfe du Bengale où ils se chargent d'humidité; ces vapeurs vont retomber en pluie sur les côtes orientales de l'Inde et le versant oriental des Ghats. Les vents redescendent froids et secs à l'ouest de ces montagnes. D'avril en octobre, la mousson de S. O., chargée des vapeurs de l'océan Indien, souffle vers Bombay et vient frapper le versant occidental des Ghats; elle y verse des

torrents de pluie extraordinaires. La sécheresse règne alors dans toute la partie orientale.

De même, dans l'Inde supérieure et la Chine occidentale, c'est la mousson de S. O., qui apporte la pluie. Dans la Chine occidentale, il pleut pendant la mousson du N. E.

Sur la côte du Pérou, qui est dans la région des alizés du S. E., la pluie est inconnue. Ces vents ont pourtant traversé l'Atlantique; mais ils se sont dépouillés de leur humidité en traversant le continent américain, et surtout en passant sur les cimes neigeuses des Cordillères. Ils sont secs et froids en redescendant le versant occidental de ces montagnes. Dans les Cordillères, le côté du vent est pluvieux; le côté sous le vent est sec. »

Pluies d'Europe. Le tableau suivant permet d'apprécier immédiatement la répartition des pluies en Europe :

LIEUX D'OBSERVATION.	HAUTEUR DE PLUIE ANNUELLE. (Millimètres.)	NOMBRE DE JOURS PLUVIEUX.	PROPORTION POUR CENT DES JOURS PLUVIEUX PENDANT			
			L'HIVER.	LE PRINTEMPS.	L'ÉTÉ.	L'AUTOMNE.
Angleterre (Penzance).	560	164	29,9	22,6	20,5	27,0
France (Paris).. . .	550	159,7	23,8	24,3	25,4	26,4
Allemagne (Erfurt).	330	131	23,6	24,0	27,7	24,7
Hongrie (Pesth). . .	418	111,7	25,9	26,9	23,6	23,7
Russie (Kazan). . .	»	90	27,5	25,1	19,7	27,7
Sibérie (Nertschinsk)	traces	59,7	8,4	28,9	43,0	19,7

D'une manière générale, la pluie est amenée en Europe par les vents d'ouest, sauf dans le climat méditerranéen. En hiver, les vents d'ouest, plus chauds que nos côtes, leur abandonnent au passage la plus grande partie de l'eau qui les charge; ils s'épuisent ensuite sur les montagnes et arrivent dans les steppes complétement desséchés. Nos hivers sont donc humides et ceux des Steppes sont très-secs. En été, les vents de la mer rencontrent nos côtes qui sont plus chaudes qu'eux, ils se dilatent et n'abandonnent point leur vapeur d'eau qui va s'épancher sur l'Europe orientale.

La hauteur annuelle de pluie va en diminuant de l'océan Atlantique jusqu'à la Sibérie où elle est presque nulle. A Saint-Pétersbourg, au voisinage de la mer, la hauteur annuelle de pluie n'est que de $0^m,47$; elle doit être incomparablement moindre au milieu des Steppes.

Observations de pluies au dehors de l'Europe. D'après les observations de M. l'Ingénieur Aymard, la hauteur moyenne annuelle de pluie qui tombe à Alger est de 944 millimètres, et cette moyenne se répartit comme il suit entre les divers mois de l'année :

JANVIER.	FÉVRIER.	MARS.	AVRIL.	MAI.	JUIN.	JUILLET.	AOUT.	SEPTEMBRE.	OCTOBRE.	NOVEMBRE	DÉCEMBRE.
128	148	79	88	44	7	0,15	8	33	78	155	175

Aux États-Unis d'Amérique et aux Antilles, on a trouvé les nombres suivants pour les hauteurs annuelles de pluie,

État de New-York..	$1^m,00$
Philadelphie..	$0^m,97$
Baltimore..	$1^m,01$

Nouvelle-Orléans.	1m,20
Saint-Domingue	3m,05
Maranhao (près de l'Équateur). . . .	7m,00

Valeur des grandes pluies d'orage. On signale dans certains pays des pluies d'orage qui prennent en 24 heures des proportions inouïes et qui déterminent de brusques inondations auxquelles rien ne résiste. Il est intéressant de connaître les hauteurs de pluie qui correspondent à ces orages exceptionnels.

Dans ses instructions météorologiques, M. Renou cite les nombres ci-après :

« On voit, dit-il, qu'à Cayenne l'amiral Roussin a recueilli 0m,28 d'eau dans une nuit, et que M. Maillard en a vu tomber 0m,73 en vingt-sept heures à l'île de la Réunion; en Europe, on en voit tomber, dans certaines localités, des masses énormes; Flangergues, à Viviers, en a jaugé 0m,56 en dix-huit heures et Tardy de la Brossy, à Joyeuse, 0m,25 en une journée; Pagano a mesuré 0m,81 d'eau tombée à Gênes, le 25 octobre 1822. »

M. Duponchel cite une trombe qui s'est abattue, il y a quelques années, sur les territoires de deux communes de l'Hérault et qui représentait une hauteur de pluie de 0m,50 à 0m,60.

A Montpellier, on observe fréquemment des averses de 0m,20 à 0m,30; en quelques heures, il est tombé 0m,245 de pluie le 11 octobre 1863 et 0m,19 le 15 décembre 1864.

Le 1er octobre 1865, M. Mestre a recueilli, à Villeneuvette (Hérault), 0m,578 de hauteur de pluie en 26 heures, dont 0m,185 tombés en deux heures.

Ces trombes d'eau, comme on les appelle, sont généralement locales et n'embrassent que quelques milliers d'hectares; lorsqu'elles viennent à fondre sur une vallée à forte pente, elles donnent naissance à de terribles inondations.

La plus forte averse qui se soit produite à Alger, et que cite M. Aymard, a donné 0m,139 de pluie en 37 heures.

Dans son rapport sur les inondations qui ont eu lieu en 1857 dans les vallées des principaux torrents de l'Ardèche, M. l'ingénieur Marchegay cite des faits intéressants :

La pluie qui a déterminé la crue du 10 septembre est tombée, dit-il, avec une intensité incroyable vers le sommet de la chaîne des Cévennes, sur son versant oriental, depuis la source du Doux, près de Saint-Bonnet-le-Froid, jusque vers le Vigan, aux sources du Gardon.

A Aubenas, il est tombé le 10 septembre 0m,145 d'eau ; aux Poulins, près de Tournon, il est tombé 0m,101 d'eau et enfin, à Annonay, la tranche d'eau tombée a été de 0m,78. La durée de la pluie et surtout son intensité n'étaient en rien comparables sur ces trois points à la durée et à l'intensité de la pluie qui tombait le même jour vers le sommet de la chaîne. — Dans le bassin supérieur de l'Érieux, la pluie a duré, le 10 septembre, de 10 heures du matin à 5 heures du soir, avec une telle violence, que le talus des montagnes était couvert d'une couche d'eau de plusieurs centimètres d'épaisseur. M. Marchegay évalue au moins à 0m,30 la hauteur de la tranche d'eau qui est tombée sur la montagne du 9 au 10 septembre.

Pendant la crue énorme des torrents de l'Ardèche, l'Isère, la Drôme et les autres torrents qui descendent des Alpes sur la rive gauche du Rhône, étaient à leur plus bas étiage. — En effet, ils échappent à l'action du vent de sud-est.

Le vent du sud-est, apportant les vapeurs de la Méditerranée échauffées par le sol de la Provence, ne pouvait avoir aucun effet sur la rive gauche du

Rhône, tandis que, rencontrant au sommet des Cévennes une basse température, et probablement le vent du nord, il y déterminait un orage terrible accompagné de tonnerres et d'éclairs, et suivi d'une pluie diluvienne.

A Paris et dans le bassin de la Seine, les trombes d'eau ne se produisent guère avec l'intensité que nous venons de reconnaître. — Si nous dépouillons les quatre derniers annuaires météorologiques, nous trouvons qu'il est tombé à Paris:

1870.	— 30 octobre.	13	millimètres de pluie.
1871.	— 23 avril.	18	—
—	— 16 juin.	27	—
—	— 18 juin.	18	—
—	— 12 juillet.	18	—
—	— 30 juillet.	29	—
—	— 4 août.	23	—
—	— 5 septembre.	17	

En janvier 1872, il est tombé beaucoup de pluie 0^{m},057; le maximum par jour s'est produit le 15 janvier et n'a été que de 0^{m},0095. — Nous trouvons en avril une hauteur de 0^{m},011, le 22, une hauteur de 0^{m},020, le 20 juin, de 0^{m},015 et de 0^{m},033 le 14 et le 28 juillet, de 0^{m},016 le 30 septembre.

L'année suivante, nous remarquons 0^{m},021 le 19 octobre 1872, 0^{m},021 le 18 novembre, 0^{m},019 le 6 décembre, 0^{m},016 le 19 janvier 1873, 0^{m},026 le 17 avril, 0^{m},014 le 27 mai, 0^{m},028 le 18 juin.

Pendant l'année météorologique 1873-1874, nous trouvons 0^{m},026 le 23 octobre et 0^{m},017 le lendemain, 0^{m},011 le 24 mai 1874 et autant le 19 juin; enfin 0^{m},015 le 9 août.

RELATIONS ENTRE LES VENTS ET LA PLUIE.

Les courants de l'océan aérien sont le véhicule qui porte la vapeur d'eau d'un point du globe à l'autre. Lorsqu'un de ces courants passe sur une surface liquide, il détermine une abondante évaporation et se sature de vapeur. — Vient-il à rencontrer ensuite une région plus froide, la saturation ne peut se maintenir; une grande partie de l'eau se condense et retombe en pluie sur le sol.

Tout le mécanisme de la production de la pluie est dans ces quelques mots : contact de régions froides avec un vent saturé venant de régions plus chaudes.

Les vents soufflant de l'Équateur vers les pôles, les vents chauds comme on les appelle, sont des vents pluvieux; à mesure qu'ils approchent des pôles, ils se refroidissent; en admettant même qu'ils ne soient point saturés de vapeur d'eau à l'origine, ils finissent par atteindre le point de saturation; lorsqu'ils le dépassent, la vapeur d'eau se condense, elle passe à l'état vésiculaire; l'atmosphère perd sa transparence et les nuages apparaissent.

Si le refroidissement est rapide, les nuages se forment en quelques instants, ils sont épais et noirs; si le refroidissement est progressif, ils se manifestent d'abord par des vapeurs blanchâtres qui peu à peu s'étendent.

Pluies des régions équatoriales. — Les vents équatoriaux, avons-nous dit, sont chauds et humides; il en est de même des courants atmosphériques ascendants.

C'est à ces courants ascendants qu'il faut attribuer les pluies torrentielles de

la zone des calmes équatoriaux. Les alizés des deux hémisphères viennent se choquer à l'équateur et se confondre dans la zone des calmes ; ils s'échauffent sous l'influence des rayons du soleil au zénith, se chargent de vapeur d'eau et s'élèvent dans l'atmosphère. En s'élevant, ils rencontrent des régions froides ; une abondante condensation se produit ; le navigateur marche sous une voûte de nuages noirs qui, sans cesse, déversent sur l'Océan des torrents de pluie. C'est une circulation ininterrompue de la surface de la mer aux hauteurs de l'atmosphère, et de celles-ci vers l'Océan.

Cette évaporation et cette condensation rapide de masses d'eau considérables est accompagnée d'une grande production d'électricité, et c'est au milieu des éclairs et du tonnerre que les nuages se résolvent en pluie.

Le soir, le phénomène perd de son intensité ; souvent même, il disparaît pendant la nuit et le ciel retrouve sa clarté ; mais pendant que le soleil darde ses rayons, de dix heures du matin à quatre heures de l'après-midi, l'évaporation redouble d'activité et les nuages s'amoncellent.

L'action directe du soleil, qui pompe les vapeurs de la terre et de l'Océan et les soulève jusque dans les régions froides de l'atmosphère, où elles se condensent pour retomber en pluie, cette action est donc la cause prédominante de la formation des nuages à l'équateur.

Les nuages et la pluie suivent le soleil dans sa marche ; si toute l'année le soleil demeurait dans le plan de l'Équateur, la zone des calmes serait immobile, la voûte des nuages qui lui correspond formerait autour du globe un anneau immuable, s'étendant, à une certaine distance, de chaque côté de l'Équateur.

Mais il n'en est pas ainsi ; pendant l'été de notre hémisphère, le soleil reste au nord de l'équateur, il atteint le solstice, puis redescend pour couper l'équateur à l'équinoxe, il passe alors dans l'hémisphère sud, descend jusqu'au solstice d'hiver, puis remonte vers l'équateur qu'il traverse de nouveau à l'équinoxe du printemps.

La zone des calmes et des pluies torrentielles se déplace avec le soleil ; les pays situés au voisinage de l'Équateur ont, chaque année, deux saisons pluvieuses, au moment des équinoxes, et deux saisons sèches au moment des solstices. Lors des solstices, ce sont les alizés de l'un ou l'autre hémisphère qui se font sentir et qui, pendant trois mois environ, soufflent avec leur allure régulière.

Lorsqu'on considère des régions situées aux extrémités de la zone tropicale, Saint-Louis du Sénégal par exemple, il n'y a plus chaque année qu'une saison pluvieuse et qu'une longue saison sèche ; la saison pluvieuse a son maximun vers notre solstice d'été.

Pluies des régions extratropicales. — Les alizés, vents froids qui vont des pôles à l'équateur, ne sont jamais pluvieux : à mesure qu'ils s'avancent, ils s'échauffent et leur point de saturation s'élève.

Les régions qui se trouvent à la limite des alizés, et dans lesquelles ceux-ci ne règnent que pendant une partie de l'année, ont, chaque année, une saison sèche et une saison pluvieuse : la saison sèche dure tant que les alizés se font sentir, et la saison pluvieuse se manifeste pendant que règnent les contre-alizés.

Considérons notre hémisphère ; les contre-alizés sont nettement établis au-dessus du parallèle 40° ; ils soufflent du sud-ouest et sont chargés de vapeur. A mesure qu'ils s'avancent vers le nord, ils se refroidissent, la vapeur d'eau se

condense, l'atmosphère est presque toujours chargée de nuages qui se résolvent en pluie dès que la saturation atteint un certain degré.

Lorsque ces vents humides arrivent sur les côtes occidentales de l'Europe, si c'est en hiver, ces côtes sont froides, une forte condensation se produit, qui détermine des pluies abondantes ; les nuages déchargés passent sur le continent et ne lui abandonnent plus qu'une quantité de pluie relativement inférieure à celle que reçoivent les côtes. Au contraire, en été, la terre est plus chaude que l'atmosphère, les vents humides ne sont plus saturés dès qu'ils touchent les côtes ; ils vont se déverser à l'intérieur du continent. En hiver, c'est sur les îles Madères, sur la péninsule espagnole et portugaise que les pluies se font surtout sentir ; en été, c'est dans nos régions.

Nous avons démontré précédemment, par de nombreux exemples, l'influence qu'exercaient sur la répartition des pluies les obstacles que présente la surface du sol, tels que les chaînes de montagnes et les vallées. Nous nous contentons ici de décrire le mécanisme général du phénomène de la pluie sur le continent européen.

En un lieu donné, les vents pluvieux sont les vents chauds soufflant de la mer : sur les bords de la Méditerranée, les vents du sud et surtout ceux du sud-est, qui ont traversé la Méditerranée dans sa plus grande largeur, sont chargés d'humidité qui se transforme en pluie au contact des montagnes qu'on trouve partout à quelque distance des côtes.

Dans la Patagonie, à l'extrémité de l'Amérique du Sud, les vents d'ouest règnent sans cesse ; ils ont parcouru tout le Pacifique sans rencontrer d'obstacle ; aussi déversent-ils des pluies torrentielles sur la première terre qu'ils rencontrent.

Influence des forêts sur les quantités de pluie. — C'est une question qui n'est pas encore complétement élucidée que de connaître l'influence exercée par les forêts sur la pluie.

Les forêts protègent contre le ravinement le sol qui les porte et sont, par conséquent, le meilleur palliatif à opposer aux ravages des torrents ; ce point n'est pas douteux. Mais les forêts modifient-elles la répartition des pluies ; les régions aujourd'hui déboisées recevaient-elles jadis plus d'eau qu'elles n'en reçoivent aujourd'hui ?

On reconnaît généralement que, sous ce rapport, l'influence des forêts ne peut être bien sensible ; le phénomène de la pluie a sa cause principale dans les grands courants de l'atmosphère et dans les obstacles qui leur sont opposés ; une forêt qui s'élève à quelques mètres au-dessus du sol ne paraît pas devoir exercer une action bien sensible sur les masses d'air humide qui occupent en hauteur plusieurs centaines de mètres dans l'atmosphère.

« Quand on voit la pluie, dit M. Renou, ne dépendre, dans son principe, que des grands mouvements de l'atmosphère et ne se modifier que par les principaux accidents du sol, montagnes et mers, on se demande quelle influence peuvent avoir sur ce phénomène les cultures des hommes et surtout les forêts. Une opinion générale leur attribue une part notable dans la distribution des eaux météorologiques, mais cette opinion, purement théorique, ne repose absolument sur rien ; on n'a jamais cité une seule observation incontestable à son appui, et si, dans certaines contrées comme l'Algérie, il pleut plus sur les forêts que dans les régions déboisées, en leur attribuant une influence sur la pluie, on a confondu la cause avec l'effet. La pluie suit d'une manière frappante le relief du sol et les forêts ne viennent spontanément que là où il pleut suffisamment. »

Les expériences entreprises dans le but de rechercher les hauteurs de l'eau

qui tombe sur une forêt et sur une plaine voisines ont donné des résultats discordants ; c'est qu'en effet la quantité de pluie dépend, non pas de la végétation qui recouvre le sol, mais des circonstances topographiques et des obstacles rencontrés par les vents pluvieux.

On a invoqué aussi à l'appui de l'action prétendue des forêts les variations qu'on a remarquées dans les hauteurs d'eaux météoriques observées dans des régions autrefois recouvertes de forêts et aujourd'hui déboisées.

Ainsi, certains auteurs prétendent que le climat de Paris est devenu moins pluvieux, et invoquent comme preuve la différence entre les résultats des observations récentes et ceux des observations anciennes. Cette raison n'est pas fondée; toutes les observations anciennes sont défectueuses, elles manquent de précision et, dans une question aussi importante, on ne peut les prendre comme bases.

Toute conclusion tirée de ces chiffres est donc suspecte et, pour le moment, il convient, suivant l'expression de M. Cézanne, de reléguer l'action des forêts parmi les infiniment petits de la météorologie.

Des nuages. — Les nuages, véhicules de la pluie, affectent les formes les plus diverses, et souvent l'œil prend plaisir à les suivre dans leurs transformations incessantes. Cette infinie variété de formes se réduit cependant à quatre types principaux, représentés par la fig. 20.

Les cirrus sont ces petits nuages, semblables à des barbes de plume ou à de la laine cardée, qui se promènent dans les hautes régions de l'atmosphère. On

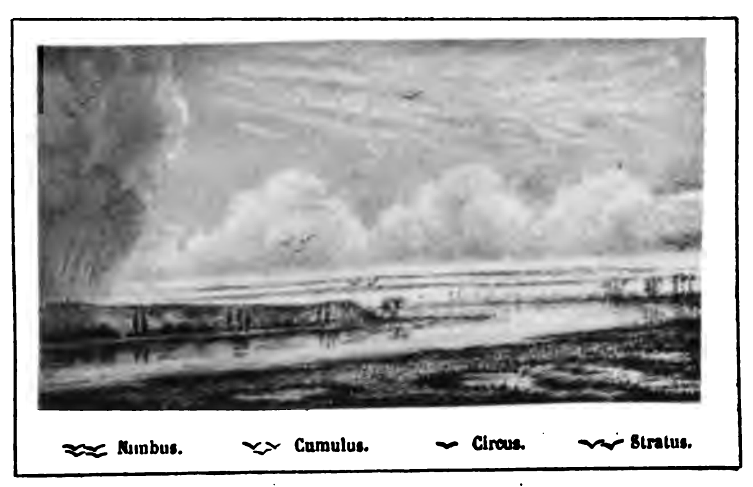


Fig. 20.

les croit, dit M. Marié-Davy, composés de particules de glace et leur apparition précède souvent un changement de temps.

Les stratus, plus foncés, plus rapprochés de l'horizon, affectent la figure de couches ou strates horizontales : leur forme tient à ce que ce sont des nuages aperçus par la tranche.

Les cumulus, gros nuages à formes arrondies, semblent des entassements de montagnes à sommets émoussés ; ils sont fréquents en été, se forment le matin et souvent disparaissent le soir ; surmontés de cirrus, ils indiquent de la pluie ou des orages.

Les nimbus, noirs et voisins de la terre, sont les nuages qui se résolvent en pluie ; affectant à la partie haute la forme cumulus, ils descendent par en bas jusqu'à la terre, et le faisceau de pluie qu'ils abandonnent se manifeste aux yeux de l'observateur.

Il est des nuages qui participent à la fois de deux types différents : on remarquera, par exemple, des cumulo-stratus semblables à des champignons dont la tête est un cumulus et dont le pied s'aplatit en stratus, des cirro-cumulus, nuages élevés et arrondis, qui donnent ce qu'on appelle un ciel moutonné.

Des cartes du temps. — Une série d'observations, résumée par une ou plusieurs colonnes de chiffres, est, sans doute, fort utile, mais elle exige un certain travail lorsqu'on veut démêler les circonstances des phénomènes, et à première vue elle ne représente rien.

Lorsqu'au contraire on reporte sur une carte toutes les circonstances météorologiques observées à une certaine époque, dans une région déterminée, on suit de l'œil les phénomènes et l'on reconnaît les causes de leurs variations ; en un instant on embrasse une contrée entière, et tous les résultats sont mis en lumière.

Ces quelques mots suffisent à faire comprendre toute l'importance qui s'attache aux cartes du temps.

Lorsqu'on possède des exemplaires imprimés de la carte d'un pays, on en prend chaque jour un exemplaire et, à côté de l'emplacement de chaque station météorologique, on inscrit la pression barométrique, la température, la direction et la force du vent, l'état du ciel et du temps.

En France, on a recours aux signes que nous avons réunis dans la figure 21, et dont voici l'explication :

Les signes 1 à 6 marquent l'état du ciel ; le cercle blanc 5 indique un ciel



Fig. 21.

sans nuages ; les cercles 1, 2, 3, 4, dans lesquels on a noirci le quart, la moitié, les trois quarts ou la totalité de la surface, indiquent un ciel un peu

nuageux, nuageux, très-nuageux, couvert. La couronne noire 6 est l'indice d'un brouillard persistant.

Quant aux phénomènes météorologiques accidentels, ils sont marqués par les signes 7 à 16. Le petit cercle blanc 8 indique un ciel brumeux à l'horizon ; le cercle noir 7 est la pluie ; le signe 9 marque la neige, 10 la rosée, 11 la gelée, 12 la gelée blanche, 13 un orage sans pluie, 14 un orage avec pluie, 15 le grésil, 16 la grêle.

Les signes 17 à 24 marquent la direction du vent : ce sont des carrés traversés par une flèche suivant la direction du vent ; 17 est le vent du sud, 18 du sud-ouest, 19 de l'ouest, 20 du nord-ouest, 21 du nord, 22 du nord-est, 23 de l'est et 24 du sud-est.

Enfin, les signes 25 à 31 indiquent la force du vent : 25 indique un vent nul, c'est un carré avec un petit zéro ; le carré 26, avec un seul point, vent faible ; le carré 27, avec deux points, vent modéré ; 28, avec trois points, vent assez fort ; 29, avec quatre points, vent fort ; 30, avec cinq points, vent très-fort ; 31, avec six points, vent violent.

Dans les annales des ponts et chaussées de 1873, M. l'ingénieur en chef Malézieux a décrit le système de notations en usage dans le service météorologique des États-Unis d'Amérique.

Il existe soixante-quatorze postes météorologiques où l'on fait trois observations par jour, à l'heure de Washington ; ces observations sont aussitôt transmises par le télégraphe et consignées sur des tableaux en papier pelure, que l'on répand dans le public et la presse. Ces tableaux portent :

1° La hauteur barométrique, qui a subi la correction relative à la température et à l'altitude ;
2° Le changement de hauteur survenu depuis huit heures ;
3° La température ;
4° Le changement qu'elle a subi depuis vingt-quatre heures ;
5° L'état hygrométrique, en centièmes ;
6° La direction du vent ;
7° Sa vitesse ;
8° Sa pression en livres par pied carré ;
9° Sa force, mesurée à l'échelle de Beaufort ;
10° Les nuages supérieurs, leur qualité, leur importance et leur direction ;
11° Les nuages inférieurs ;
12° La pluie tombée depuis huit heures ;
13° Le changement survenu depuis vingt-quatre heures dans le niveau de la rivière ;
14° L'état du temps.

On remarquera, dit M. Malézieux, l'importance attachée à l'observation des vents supérieurs. La girouette ne donne le vent qu'à la surface du sol, de même qu'un moulinet de Woltmann, plongé dans des eaux profondes, ne donne que la vitesse du fond, souvent bien différente de celle de la masse du courant. Les indications de la girouette ne s'appliquent qu'aux couches inférieures des courants de l'océan aérien, c'est-à-dire à celles qui, dans leur marche, sont soumises à mille influences. Il serait d'une haute utilité de connaître l'allure du courant à la surface, et c'est ce qu'on a songé à obtenir au moyen de ballons captifs. Pour les savants américains, l'observation des nuages supérieurs tend au même but, et cette observation peut avoir de grands résultats pour la navi-

gation aérienne. Qui sait, dit M. Malézieux, si l'on ne découvrira pas des courants d'air spéciaux analogues aux courants de la mer?

Le tableau n'est qu'un travail préliminaire ; le véritable résumé des observations est la carte météorologique. C'est une carte orographique, où l'on a marqué par trois teintes différentes les trois grands étages d'altitude des États-Unis, savoir : 1° les parties basses de la terre ferme, de 0 à 244 mètres d'altitude ; 2° la région montagneuse des Alleghanys ainsi que la *prairie*, qui s'étend jusqu'à 2440 mètres d'altitude ; 3° la région d'une altitude supérieure à 2440 mètres.

La carte ne porte guère que les postes d'observations, indiqués par des cercles de quatre millimètres de diamètre.

« Ces cercles sont tantôt teintés en rouge, indice de temps couvert, tantôt complétement vides, indice de temps clair, ou simplement traversés par une bande verticale, indice de beau temps ; d'autres contiennent un R (rain) pour indiquer la pluie, ou une S (snow) pour indiquer la neige. Enfin une flèche, divisée par le cercle en deux parties, indique, s'il y a lieu, l'existence et la direction du vent. »

A côté de chaque cercle sont inscrits trois nombres, également à l'encre rouge et imprimés en même temps sur la carte originelle. Le premier de ces nombres indique la température, le second la pression et le troisième la vitesse du vent.

La carte est complétée par deux séries de courbes isobarométriques et de courbes isothermes, imprimées en deux couleurs différentes, avec la cote caractéristique de chacune d'elles en gros chiffres.

« Les courbes isobarométriques surtout sont fort expressives ; elles peignent véritablement à l'œil la surface mouvementée, ondulée, de l'océan atmosphérique ; car rien n'empêche (que nous sachions) d'expliquer la différence de pression par une différence de hauteur dans les couches d'air superposées ; il y a donc une saillie au point où le baromètre accuse une pression plus grande et un creux à l'aplomb du baromètre qui baisse. Juxtaposant les trois cartes qui représentent l'état de l'atmosphère à trois moments du jour, il nous semble voir, comme dans un phénakisticope, la surface osciller, la vague culminante se déformer, s'allonger ou s'arrondir, se déplacer surtout, emportant avec elle les promesses de beau temps ou les menaces de tempête que recèlent les plis divers de l'océan aérien. »

La figure 22 représente une ancienne carte météorologique française (18 novembre 1864) relevée par M. Marié-Davy : les courbes noires sont des courbes d'égale pression barométrique. Leurs chiffres varient de 5 en 5 millimètres. A côté de chaque station météorologique, on inscrit la pression atmosphérique observée, réduite au niveau de la mer. Les courbes isobarométriques espacées de 5 en 5 millimètres ne correspondent presque jamais exactement aux stations, mais on comprend sans peine qu'il est facile de les tracer par estime, en partageant proportionnellement aux différences de pression l'espace compris entre deux stations voisines. A partir du cercle qui indique chaque station est tracée une flèche dans la direction du vent et l'intensité en est marquée par le nombre des pennes de cette flèche, lequel varie de 1 à 6. Les cercles, suivant qu'ils sont blancs ou teintés, indiquent l'état du temps. La carte américaine, avec ses teintes différentes et ses chiffres apparents, doit être plus commode et plus simple à lire que la nôtre, dont il est du reste facile de corriger les imperfections.

Quoi qu'il en soit, la figure 22 nous montre que le 18 novembre 1864 l'Europe

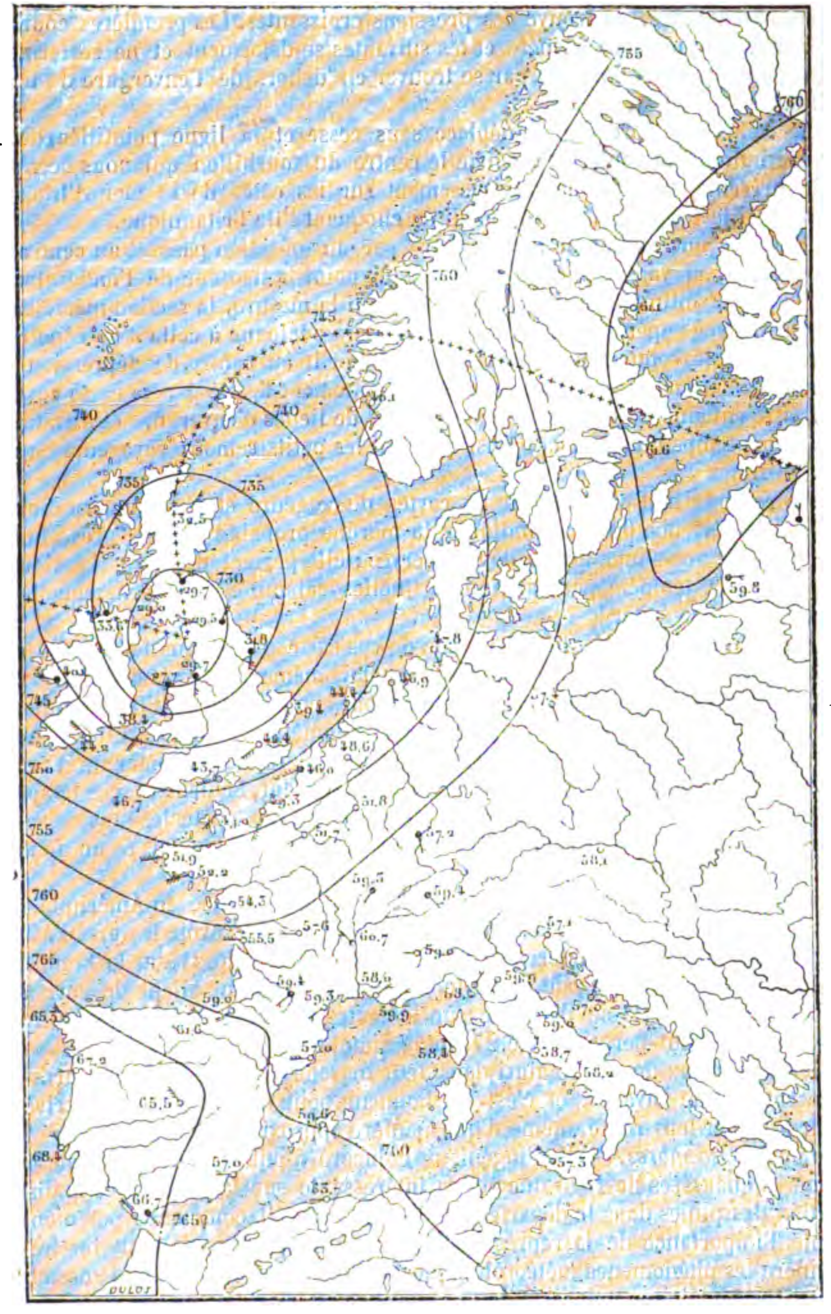


Fig. 22.

était assaillie par un grand tourbillon atmosphérique dont le centre se trouvait

sur l'Écosse. C'est au centre que la pression atmosphérique est minima : elle est descendue à 729^{mm},5 ; à mesure qu'on s'éloigne du centre dans des directions rayonnantes, on trouve des pressions croissantes. Les premières courbes isobarométriques sont fermées et les suivantes se déforment et ne se ferment plus parce qu'elles finissent par se trouver en dehors de l'envergure du tourbillon.

Le centre de dépression se déplace sans cesse et la ligne pointillée de la figure indique la route qu'a suivie le centre du tourbillon qui nous occupe ; elle présente un point de rebroussement sur les côtes de la mer d'Irlande, comme si le tourbillon avait rebondi en choquant l'île Britannique.

Imaginez une section de l'atmosphère par un méridien passant au centre de dépression, si vous admettez qu'en chaque point la hauteur de l'onde atmosphérique est intimement liée à la pression qui la mesure, la section méridienne de la surface supérieure de l'atmosphère sera analogue à celle d'un cône renversé dont le sommet se trouverait précisément au centre de dépression. De sorte que le tourbillon se présente et est nettement figuré par la carte comme un vaste entonnoir ayant plusieurs centaines de lieues d'envergure et s'avançant en même temps qu'il tourne, ainsi que font les petits remous voyageurs de nos rivières.

En reproduisant chaque jour les cartes de ce genre et les comparant entre elles, l'expérience finit par indiquer la marche probable d'une dépression qui se présente sous une forme déjà observée ; elle permet donc de signaler les pays que la tempête peut atteindre. Quelles calamités ces avertissements ne peuvent-ils pas éviter !

Un grand fait est résulté de l'étude de ces cartes : c'est que toutes nos tempêtes nous arrivent de l'Atlantique, quelquefois même des bords de l'Amérique. Dans ce cas, elles mettent de six à quinze jours pour franchir l'Océan ; elles le parcourent avec une vitesse moyenne de 25 kilomètres à l'heure. Elles peuvent nous être signalées dès leur naissance par le télégraphe sous-marin, et même par les paquebots, qui dans certains cas les devancent. Seulement, ces tempêtes signalées de si loin sont exposées en route à bien des obstacles sans cesse variables ; elles sont déviées et déformées, et meurent quelquefois avant de nous atteindre.

La fameuse tempête de septembre 1866 a pris naissance en Amérique, sur une ligne allant de Buenos-Ayres au pôle Nord ; après avoir traversé l'Atlantique, elle aborde l'Angleterre le 20 septembre, passe le 21 sur la France, la Belgique et la Hollande ; le 22, elle règne sur une ligne allant de Paris à la Norvège ; le 23, elle se déchaîne sur le centre de la France ; le 24 sur Lyon, le 26 sur le Saint-Bernard et le 27 sur le Simplon.

Il est curieux de suivre ainsi dans leur marche ces puissants météores qui causent tant de ravages, et c'est un honneur pour la science d'être arrivée à leur assigner leur route, même d'une manière approximative.

Courbes isoombres. — M. l'ingénieur Poincaré a publié dans les annales des ponts et chaussées de 1873 une notice intéressante sur la marche et la distribution des pluies dans le département de la Meuse. Il commence par montrer toute l'importance de la représentation graphique, qui seule peut mettre en lumière les phénomènes météorologiques, et surtout en faire saisir l'ensemble ; puis il construit sur une carte de la région trois séries de courbes :

1° Les courbes isoombres qui, reliant tous les points où est tombée une même hauteur d'eau dans un temps donné ou pendant une pluie déterminée,

montrent la quantité et la distribution de la pluie reçue par la surface considérée pendant telle période ou dans telle circonstance ;

2° Les courbes horaires qui, passant par tous les points où une pluie déterminée a commencé à la même heure, marquent sa progression ;

3° Les trajectoires suivies par les nuages pluvieux entre les courbes horaires dans certaines circonstances déterminées.

L'étude des isoombres de la Meuse a conduit à une remarque importante : c'est que ces courbes sont en concordance frappante avec les lignes limitant les gradins qui dessinent l'ossature de la contrée.

En étudiant les lignes horaires, on s'aperçoit bien vite que la marche des différentes pluies sur une contrée présente une grande régularité ; toutes les inflexions des courbes, dit M. Poincaré, s'expliquent nettement tant par les mouvements atmosphériques généraux que par les dispositions du relief du sol, et surtout par celles des gradins et des chaînes.

« Sauf des irrégularités sans importance, la marche et la distribution de la pluie sont complétement solidaires et toutes deux sont commandées par le relief. Pour s'en rendre compte, il faut rechercher les lieux de passage, d'agglomération, d'ascension, etc., des masses pluvieuses ; il faut ne pas perdre de vue les règles qui dérivent directement de cette manière d'envisager la question ; par exemple : qu'une grande production est suivie d'une diminution par épuisement ; que, si un versant est attaqué directement, le maximum sera d'autant plus haut placé que la pente sera plus faible.

« Le mode de répartition de la pluie, même entre points voisins, est totalement différent suivant la direction du vent pluvieux.

« Entre les quantités reçues par deux stations rapprochées, le rapport est sensiblement constant pour les pluies générales d'une direction déterminée et pour les ensembles d'ondées de cette direction prises en nombre très-limité. »

DE LA PRÉVISION DU TEMPS. — PRONOSTICS.

De même qu'on est arrivé à prévoir et à annoncer les marées de l'Océan ainsi que les crues d'un fleuve, de même on peut espérer qu'on arrivera à prédire les mouvements généraux de l'atmosphère et à signaler d'avance aux localités menacées l'approche des orages et des tempêtes. Malheureusement, les marées de l'atmosphère sont sujettes à bien des influences, à bien des obstacles variables que ne rencontrent pas les marées régulières de l'Océan. Une longue expérience sera donc nécessaire pour reconnaître d'une manière précise la marche des phénomènes de l'atmosphère.

A côté des déductions scientifiques exposées au cours de cet ouvrage que nous résumerons tout à l'heure, il faut placer les pronostics vulgaires, sortes de formules empiriques établies par la tradition d'une longue expérience, et qui ne sont pas toujours à dédaigner. Bien que bizarres en apparence, elles reposent quelquefois sur des réalités et c'est à l'observateur sagace qu'il appartient d'en rechercher le fort et le faible.

Pronostics tirés de l'observation du baromètre. — Les vents secs et froids, c'est-à-dire les courants polaires, font monter le baromètre ; les vents chauds et humides, c'est-à-dire les courants équatoriaux, le font baisser. Dans

nos climats, c'est donc un signe de beau ou de mauvais temps suivant que le baromètre monte ou baisse. S'il monte, ce sont les courants polaires qui deviennent prédominants ; s'il baisse, ce sont les courants équatoriaux.

La baisse la plus accentuée se manifeste lorsque le baromètre se trouve au centre d'un tourbillon atmosphérique. En effet, dans le mouvement tournant l'air est refoulé à la périphérie de l'entonnoir, un vide relatif s'établit au centre et le vide est d'autant plus sensible, que le tourbillon est plus violent. Ainsi, le baromètre baisse à mesure qu'on s'approche du centre du tourbillon et c'est en ce centre que la colonne barométrique atteint son minimum.

La pression atmosphérique moyenne pour laquelle la hauteur de la colonne du baromètre à mercure est de 760 millimètres, correspond au temps variable ; au-dessus de cette moyenne, de 9 en 9 millimètres, correspondent les mentions beau temps, beau fixe, très-sec ; au-dessous, et aussi de 9 en 9 millimètres, correspondent les mentions pluie ou vent, grande pluie, tempête. Tout le monde connaît ces indications ; mais il ne faut pas leur accorder une absolue confiance, et les variations de la colonne barométrique doivent être interprétées. Il va sans dire que la position du variable doit être réglée d'après l'altitude du lieu d'observation : à Genève, le variable correspond à la hauteur moyenne $0^m,73$, tandis qu'à Paris il correspond à la moyenne $0^m,76$.

Nous reproduisons ici les instructions sur l'emploi du baromètre données par l'amiral Fitzroy, ancien directeur du service météorologique de l'Angleterre :

Ces instructions, applicables aux îles Britanniques, pourront être utiles aux marins qui fréquentent ces parages ou les côtes françaises de l'Océan ou de la Manche, dont le climat est analogue avec celui de la Grande-Bretagne.

Ce n'est pas seulement en observant la hauteur du baromètre que l'on peut se former une opinion sur l'état du temps, mais surtout en observant les variations de cette hauteur, c'est-à-dire les mouvements du mercure. C'est par ces mouvements de hausse ou de baisse pendant les jours ou les heures qui viennent de s'écouler, que l'on peut prévoir les changements qui auront lieu dans la force ou la direction du vent, aussi bien que dans la quantité d'humidité répandue dans l'air.

Sous nos latitudes, la hauteur du baromètre peut atteindre, dans les cas extrêmes, 784 millimètres au plus haut, 711 au plus bas. Les oscillations moyennes ont lieu entre 737 et 774 millimètres.

Si le baromètre étant à sa hauteur moyenne (760 millimètres au niveau de la mer), s'y maintient ou monte, tandis que le thermomètre descend et que l'humidité continue, on verra des vents de N. O., N. ou N. E. ; ou bien le vent mollira, ou la pluie (ou la neige) diminuera. Si, au contraire, il descend, tandis que le thermomètre monte et que l'humidité augmente, on doit s'attendre à des vents S. E., S. ou S. O., accompagnés de pluie. Une baisse du thermomètre, quand le baromètre est bas, indique de la neige (en hiver). Il y a exception à ces règles quand on est menacé de vents N. E. humides (c'est-à-dire avec pluie, neige ou grêle). Dans ce cas, la direction du vent à venir fait monter le baromètre.

Quand le baromètre est au-dessous de sa hauteur moyenne, un mouvement d'ascension indique que le vent mollira ou tournera au nord, ou que la pluie diminuera. Mais s'il a été très-bas (vers 740 millimètres), son premier mouvement de hausse indique ou précède de fortes brises, quelquefois des bourrasques du N. O., N. ou N. E. Puis, si le baromètre continue à monter et que le thermomètre baisse, le temps s'améliorera ; mais si la chaleur continue, le

temps pourra tourner dans le sens contraire du mouvement solaire et venir du S. ou du S. O., surtout lorsque le baromètre monte rapidement.

Les coups de vent les plus dangereux, les plus fortes bourrasques du nord arrivent au moment où le baromètre monte après avoir été très-bas, ou quelque temps après, si le vent tourne graduellement.

Bien que les oscillations du baromètre indiquent surtout le temps à venir, généralement, quand le mercure est au-dessus de 760 millimètres, on doit compter sur du beau temps et de belles brises, à l'exception de quelques cas de vent soufflant entre l'est et le nord.

Si les mouvements du baromètre sont rapides, le temps annoncé sera de peu de durée. Ce sera le contraire si les mouvements sont lents.

Les vents de S. O. S., S. E. font surtout baisser le baromètre. Les plus grandes hauteurs ont lieu, au contraire, par les vents de N. O., N. et N. E.

Cependant le baromètre peut monter par un vent du sud sec et accompagné de beau temps, de même qu'il peut baisser par un violent coup de vent du nord qui serait accompagné de pluie, neige ou grêle, quelquefois d'éclairs.

Si le baromètre baisse beaucoup, on aura beaucoup de vent ou de pluie (neige, grêle, éclairs). Le vent sera du nord si le thermomètre est bas pour la saison ; du sud si le thermomètre est haut. Quelquefois ce ne sont que des éclairs, lorsque l'orage est au delà de l'horizon.

Une baisse soudaine du baromètre, par un vent d'ouest, est quelquefois suivie d'un violent coup de vent de la partie du nord.

Lorsqu'un vent frais se lèvera de l'est ou du S. E. et tournera au sud, le baromètre continuera de descendre jusqu'à ce que le vent soit près de changer d'une manière notable, moment où il peut y avoir du calme ; puis le vent reprendra peut-être tout d'un coup et avec violence, et son mouvement vers le N. O. et le nord sera indiqué par un mouvement ascendant du baromètre et la baisse du thermomètre.

Le vent tourne généralement comme le soleil (ou de gauche à droite) ; quand le contraire a lieu, c'est signe de mauvais temps.

Le baromètre commence à monter longtemps avant la fin d'un coup de vent ; quelquefois même à son commencement. Du reste, s'il baisse beaucoup avant des vents violents, il baisse encore plus avant de grandes pluies. Les orages sont indiqués, mais pas toujours, par la baisse du baromètre ; des nuages orageux venant du N. E. en sens contraire du vent ne font pas ordinairement baisser le baromètre. Avant et pendant la première période d'un beau temps, le baromètre est ordinairement haut et sans mouvement, l'air étant sec.

On voit, mais rarement, des exemples de beau temps et d'un baromètre très-bas ; c'est toujours le pronostic d'une série de jours de vent ou de pluie, sinon de l'un et de l'autre. Un beau temps calme et très-chaud peut être suivi d'orage, ou de bourrasques et de pluie. Cela arrive toutes les fois que la température est beaucoup au-dessus de celle de la saison.

Si quelques-unes des indications du baromètre ne semblent pas justifiées par les événements, il ne faut pas accuser l'instrument, mais penser que ses oscillations peuvent provenir de circonstances atmosphériques dont l'observateur ne ressent pas les effets, parce que ce sont des coups de vent ou de petites pluies qui règnent dans les parages voisins, mais au-dessous de l'horizon et, par conséquent, au delà de la vue de l'observateur.

Un mauvais temps de S. O., de peu de durée, ne peut pas faire baisser beaucoup le baromètre, s'il doit être suivi d'une série de vents du nord ; de même, le

baromètre peut baisser par le vent du nord et pronostiquer le beau temps, si l'on doit avoir une série de vents du sud.

Toutes ces remarques ne doivent pas empêcher de reporter l'attention sur ce qu'on appelle *les pronostics du temps*. Toute personne prudente devra combiner les indications des instruments avec les signes donnés par le ciel.

Enfin, on devra toujours prendre en considération la sécheresse et l'humidité de l'air, en même temps que sa température (comparée à la température ordinaire de la saison).

Pronostics tirés de l'observation du thermomètre et de l'hygromètre. — Les vents humides et pluvieux viennent de l'équateur; ils sont par conséquent plus chauds que les autres, et la transformation de la vapeur d'eau en eau liquide rend sensible une grande quantité de chaleur latente. Les vents secs viennent du pôle; ils sont donc froids et abaissent encore la température de l'atmosphère par l'évaporation qu'ils déterminent lorsqu'ils ne sont pas saturés.

D'une manière générale, on peut dire que, dans une saison dont la température moyenne est connue, toutes les fois que cette moyenne est dépassée, il y a probabilité de pluie ; toutes les fois qu'elle n'est pas atteinte, il y a probabilité de temps sec.

Si l'on considère un cyclone, un tourbillon atmosphérique, la compression de l'air est maxima à la périphérie de l'entonnoir, et cette compression se traduit par une température plus élevée que celle qui règne au centre de dépression.

« Malgré le grand nombre de causes générales ou locales qui peuvent rendre son langage équivoque, dit M. Marié-Davy, le thermomètre peut cependant donner des indications très-utiles, surtout quand elles viennent fortifier celles du baromètre.

« Quand, en hiver, le thermomètre descend en peu de temps de 4 ou 5 degrés au-dessous du point marqué le jour précédent à la même heure, on peut présumer que le vent tourne de la portion sud-ouest de la rose des vents, pour aller se fixer dans la portion nord-est, ce qui correspond à l'arrivée des beaux temps, à moins que le courant équatorial ne reste peu éloigné, auquel cas on a des brouillards. »

Les indications de l'hygromètre sont très-précieuses, surtout lorsqu'elles viennent corroborer celles du baromètre et du thermomètre ; si le baromètre baisse, que le thermomètre s'élève et que l'hygromètre indique une humidité croissante, il est certain que la pluie va arriver, puisque l'atmosphère se rapproche de son point de saturation.

Il est même, paraît-il, des variations de temps qui, sous l'équateur, ne sont pas accusées par le baromètre et qu'annonce l'hygromètre.

Pronostics tirés de l'état du ciel et des vents. — Dans l'*Annuaire météorologique* de 1872, M. Marié-Davy a résumé les pronostics tirés de l'état du ciel et des vents, pronostics qui résultent de l'expérience et de la tradition. Nous lui emprunterons les lignes suivantes :

PRONOSTICS TIRÉS DE L'ÉTAT DU CIEL ET DES VENTS.

L'état du ciel et des vents est le champ d'observation le plus ordinaire des habitants des campagnes. Chaque pays, et presque chaque village, a ses dictons, ses moyens d'appréciation locale transmis d'âge en âge. Il est d'autres formules qui ont un caractère de généralité plus marqué. Nous reproduisons ci-dessous les signes principaux contenus dans le *Manuel* de l'amiral Fitz-Roy :

« Qu'il soit clair ou nuageux, un ciel rosé au coucher du soleil annonce le beau temps;

« Un ciel blafard laiteux annonce du vent ou de la pluie;

« Un ciel rouge le matin annonce vent ou pluie;

« Un ciel gris le matin annonce le beau temps.

« Si les premières lueurs du jour paraissent au-dessus d'une couche de nuages, vent probable; si elles paraissent à l'horizon, beau temps.

« De légers nuages, à contours indécis, annoncent du beau temps et des vents modérés. Des nuages épais, à contours bien définis, annoncent du vent.

« Un ciel bleu foncé sombre indique du vent; un ciel bleu clair et brillant indique le beau temps.

« Plus les nuages paraissent légers, moins on doit attendre de vent (peut-être de pluie); plus ils sont épais, roulés, tourmentés, déchiquetés, plus le vent sera fort.

« Un ciel d'un jaune brillant au coucher du soleil annonce du vent: jaune pâle, de la pluie. Suivant que les teintes rouges, jaunes ou grises prédominent, on peut prévoir le temps avec une grande approximation, surtout si l'on ajoute à ces signes les indications des instruments.

« De petits nuages couleur d'encre annoncent de la pluie; des nuages légers courant au-devant de masses épaisses annoncent du vent ou de la pluie; s'ils sont seuls, du vent seulement proportionné à leur vitesse.

« Des nuages élevés courant dans une direction opposée à celle des couches de nuages inférieurs, ou du vent qui règne, indiquent un changement de vent.

« Après un beau temps clair, les premiers signes d'un changement sont ordinairement des nuages élevés en bandes légères en forme de barbe de plumes, puis des nuages pommelés qui augmentent et bientôt assombrissent le ciel. Généralement, plus ces nuages paraissent éloignés et élevés, plus le changement de temps sera lent, mais aussi plus il sera considérable.

« Observez les nuages qui se forment sur les hauteurs ou s'y accrochent : s'ils s'y maintiennent, ou descendent, c'est signe de vent et de pluie; s'ils montent et se dispersent, c'est signe de beau temps.

« Si les oiseaux de mer prennent leur vol vers le large, on aura du beau temps et des vents modérés; s'ils restent près de terre ou au-dessus de la terre, s'ils se dirigent vers l'intérieur, c'est signe de coup de vent et de tempête. Beaucoup d'autres animaux sont sensibles aux variations atmosphériques; il ne faut pas négliger ces indications.

« Ainsi, quand les hirondelles se tiennent près des habitations, volant de côté et d'autre, rasant la terre, c'est signe de vent ou de pluie. »

A ces signes nous ajouterons quelques pronostics tirés de l'état du ciel, que nous empruntons à la *Météorologie agricole* de M. de Gasparin.

« La pâleur du soleil annonce la pluie; on ne voit plus alors qu'à travers un air chargé de vapeurs. Si le soleil fait éprouver une chaleur étouffante, c'est aussi un signe de pluie; on se trouve dans ce cas entouré d'une atmosphère saturée de vapeurs et plus propre à s'échauffer à cause de son défaut de transparence.

« La couleur pâle de la lune, les cercles concentriques plus ou moins obscurs dont elle est entourée, ses cornes mal terminées, l'auréole lumineuse qui s'étend autour d'elle, et qui fait dire que la lune *baigne*, sont autant de signes de pluie. Les étoiles présentent aussi des signes pareils : leur lumière perd de sa vivacité, et elles baignent aux approches de la pluie.

« Le ciel est d'autant plus noir qu'il y a moins de vapeurs interposées entre lui et l'œil du spectateur. Sur les montagnes, il prend une couleur de bleu indigo foncé. Si l'air se charge de vapeurs, la teinte du ciel devient blanche, *farineuse*, comme on dit ; ce signe annonce aussi de la pluie.

« Les vents sont les indices du temps qu'il doit faire, non-seulement d'après leurs qualités propres, mais encore par l'étude des vents supérieurs dont on connaît la direction par la marche des nuages. Si le vent inférieur se renforce beaucoup, et que les nuages marchent en sens contraire ou dans une direction faisant un angle assez ouvert avec celle du vent, on juge que le vent inférieur va céder la place au vent supérieur.

« Les nuages fixes situés du côté où souffle le vent n'amènent que sa continuité; ils annoncent sa fin s'ils apparaissent du côté opposé.

« Les brouillards qui tombent ou se dissipent entièrement sans former de nuages accompagnent le beau temps ; mais s'ils se renouvellent plusieurs jours de suite, s'ils font place à des nuages ou qu'ils montent, la pluie est très-probable. »

PRÉVISION DU TEMPS DANS LES CAMPAGNES.

Le temps est doux et humide sur tout le parcours du courant équatorial à la surface de l'Europe ; il est sec et beau sur le trajet du courant de retour ou courant polaire ; il est également beau ou vaporeux en été et brumeux en hiver, dans l'espace compris entre les deux branches du grand circuit aérien. L'oscillation de ce circuit à la surface de l'Europe doit donc être l'objet de toute l'attention du météorologiste.

La substitution du courant polaire au courant équatorial se fait par la diminution graduelle de l'ampleur du circuit vers l'est de l'Europe. Elle s'annonce par l'apparition de fortes pressions barométriques dans le nord ou dans l'est, et les grands froids ou les grandes chaleurs débutent généralement sur le nord de la Russie une huitaine de jours avant de s'établir sur la France. Les dépêches de Suède et de Russie peuvent donc nous faire pressentir leur invasion une semaine environ à l'avance.

La substitution du courant équatorial au courant polaire a lieu, au contraire, par l'ouest et le nord-ouest. L'Espagne, l'Irlande et l'Écosse en ressentent les premiers symptômes; c'est là qu'il nous faut les chercher. Cette substitution est graduelle comme la précédente, malgré les *accidents* qui la brusquent quelquefois.

L'établissement du courant équatorial sur la France n'est pas, par lui-même, une cause immédiate de pluie ou de mauvais temps ; il faut, de plus, l'intervention de mouvements tournants qui s'y succèdent, il est vrai, presque sans interruption.

Par contre, l'établissement du courant polaire est quelquefois accompagné de pluie ou de neige, s'il est hâté par le passage d'une bourrasque, et surtout s'il n'en est que la conséquence temporaire.

Dans ce qui va suivre, nous examinerons séparément les saisons froide et chaude et nous substituerons souvent, pour simplifier l'exposé, la forme affirmative à la forme dubitative, la seule qui soit en rapport avec la nature du sujet.

SAISON FROIDE, DE NOVEMBRE A AVRIL.

Le baromètre étant haut, le ciel sans nuages, l'hygromètre au sec, si le baromètre commence à baisser, s'il se forme dans les régions élevées de l'atmosphère des nuages légers (cirrus) ressemblant à des barbes de plume ou à des brins de soie entremêlés, et marchant avec lenteur du sud-ouest vers le nord-est, le courant équatorial s'approche de nous, et déjà il règne dans les hautes régions. S'il fait froid, la température s'adoucit; s'il fait chaud, la chaleur de vient plus molle. L'hygromètre marche vers l'humide.

Tant qu'aucune perturbation n'apparaît, les phénomènes précédents s'accentuent d'une manière lente et graduelle, le ciel devient moutonneux, des cumulus isolés se forment; le beau temps peut se conserver assez longtemps.

Si, le baromètre baissant lentement, le vent s'accélère des régions d'entre N. E. et S. O., puis O., une bourrasque passe au loin dans le nord du lieu où l'on est. Les pluies accompagnent rarement les premières apparitions de ces phénomènes, si ce n'est dans le voisinage de la ligne parcourue par leur centre, à moins que l'atmosphère n'ait eu le temps de se saturer de vapeur. Mais il convient de surveiller les instruments.

Si la baisse du baromètre se ralentit, puis fait place à la hausse, si la direction d'où chassent les nuages a dépassé l'O. vers le N., la probabilité de pluie s'est écartée; mais la période des beaux temps se trouve entamée.

Si la baisse est, au contraire, un peu rapide, si le baromètre descend au-dessous de sa moyenne avant que la direction d'où chassent les nuages ait atteint l'O., la pluie est d'autant plus probable que l'on est plus près des côtes ouest ou nord-ouest de l'Océan, ou qu'on est plus élevé sur le versant ouest ou sud-ouest d'une chaîne de montagnes; elle sera d'autant plus abondante que l'air est plus chaud et plus humide, que la baisse barométrique est plus rapide et plus profonde; elle sera d'autant plus prolongée que le vent tournera plus lentement vers l'O. et le N. O.

Dès que le baromètre commence à remonter, que le vent s'approche du N. O., le ciel s'éclaircit : une tempête a passé dans le nord.

Si la hausse qui survient alors est rapide, si le vent dépasse le N. O. vers le N., sans perdre beaucoup de sa vitesse, la pluie ou la neige peuvent revenir par les vents du N. ou du N. N. E. La tourmente redescend du nord sur l'Allemagne ou l'est de la France. La température baisse alors d'une manière très-sensible.

Si, pendant une hausse rapide du baromètre, la force du vent tombe en atteignant le N. ou même avant de l'atteindre, et si la température a peu baissé, le beau temps sera peu durable : une nouvelle bourrasque ou tourmente suit la première à un intervalle d'un petit nombre de jours.

Si la température s'est soutenue, si les vents rétrogradent vers le S. O. après avoir à peine atteint le N. O., la suspension des mauvais temps est presque nulle. Les pluies se suivent presque sans interruption jusqu'à ce que le baromètre revienne à la hauteur moyenne ou s'élève au-dessus et que les vents aient franchi le N. O. vers le N.

Les mouvements tournants de l'atmosphère se succédant en moyenne à trois ou quatre jours d'intervalle, la recrudescence des pluies suit la même loi. Les bourrasques peuvent cependant être encore plus rapprochées comme, aussi, elles peuvent être très-éloignées.

La baisse du baromètre étant rapide, les vents, au lieu de tourner vers l'O.,

peuvent rester au S. et même rétrograder vers l'E. ou le N. E. avec ou sans pluie. Dans ce cas, le centre d'une bourrasque passe à peu de distance dans le sud.

Le centre d'une bourrasque ou tourmente est toujours sur la gauche du vent, c'est-à-dire dans le nord-ouest quand le vent souffle du S. O., dans le nord quand le vent est d'O., etc. Cela ne veut pas dire qu'une bourrasque existe chaque fois que souffle l'un de ces vents. Cependant, si nous en exceptons les vents d'entre E. et N. pour la plus grande partie de la France, et les vents d'entre N. et O. pour la vallée du Rhône et les côtes françaises de la Méditerranée, un vent d'une force au-dessus de la moyenne, et un baromètre au-dessous, particulièrement quand il y a pluie, annoncent une bourrasque qui vient, qui passe ou qui s'éloigne. Les vents exceptés se rattachent eux-mêmes fréquemment à des phénomènes semblables.

Le centre de la bourrasque tournante se rapproche de nous tant que le baromètre baisse. Dès que le centre a dépassé le point de sa trajectoire le plus rapproché de nous, le mercure monte. Cette distance minimum est d'autant plus faible que les mouvements de baisse et de hausse se succèdent d'une manière plus brusque et plus rapide, que la rotation des vents est plus précipitée. On est au centre même lorsque le baromètre étant bas le ciel s'éclaircit ou ne présente plus que des nuages isolés donnant des pluies de courte durée avec raffales et sautes de vent.

Il est possible à un observateur de suivre à peu près la marche des tourmentes ou bourrasques d'après les indications des instruments et sur l'inspection du mouvement des nuages.

Tant que le baromètre reste haut avec des nuages marchant de l'ouest à l'est, les bourrasques passent au loin dans le nord; les mauvais temps sont pour l'Irlande, l'Écosse, la Norvége, la Suède, la Russie.

Tant que les nuages marchent du sud avec baisse, une bourrasque est dans l'ouest, et il est à craindre qu'elle se rapproche plus près de nous, d'autant plus que la baisse est plus prononcée.

Dans le centre, l'ouest et le nord de la France, le mauvais temps avec tour des vents vers l'O. ou le N. O. montrent que le centre des bourrasques traverse l'Angleterre. Les pluies s'étendent d'autant plus avant vers le sud-est de la France que le nord-ouest a été plus mouillé par des pluies antérieures : nous sommes en plein dans le courant équatorial qui se prolonge plus ou moins avant sur l'est de l'Europe. Comme les déplacements du circuit aérien sont lents, la probabilité est que le mauvais temps durera sur le nord, l'ouest et le centre de la France; le midi peut conserver un beau ciel.

Si lés vents tournent au N. fort, ce qui indique une bourrasque descendant du nord sur l'Allemagne, c'est un signe que le circuit aérien a déjà perdu de son ampleur dans l'est de l'Europe : la continuité et la durée du mauvais temps sont devenues moins probables. Le ciel peut être très-variable sur le nord de la France; le midi est plus menacé.

Si le centre de la bourrasque traverse la France du nord-ouest au sud-est, auquel cas la rotation du vent est inverse des deux côtés de la ligne parcourue, la fin de la période présente des mauvais temps est encore plus prochaine pour le nord de la France; mais elle est souvent à son début pour le midi.

Si le centre de la bourrasque aborde la France par le golfe de Gascogne et longe les Pyrénées, elle donne sur le nord des vents d'entre N. et E. forts avec ciel nuageux ou très-beau; les pluies sont pour le midi.

Un certain antagonisme existe donc entre les versants de la Méditerranée et ceux de l'Océan et de la Manche. Les pluies peuvent y être simultanées ou y alterner à de courts intervalles; mais souvent aussi l'une des régions passe par une période de beau temps, tandis que l'autre traverse une période de pluies plus ou moins interrompues.

SAISON CHAUDE, DE MAI A SEPTEMBRE.

Le caractère de l'été change beaucoup suivant que nous sommes placés dans le courant équatorial, dans le courant de retour ou polaire, ou dans l'anse comprise entre ces deux courants.

Dans le premier cas, l'été est froid et pluvieux, si le courant équatorial est bien établi sur l'Europe et s'il y possède une certaine activité. Les signes du temps et les variations du baromètre y ont alors la même valeur que dans la saison froide.

Dans le second, l'été est sec et brûlant pour les plantes sur les terres à sous-sol perméable et peu profond. Le baromètre se tient élevé, et les vents restent compris dans les rhumbs N. et E., au milieu d'excursions peu durables, tantôt vers le N. O. tantôt vers le S. E.

Dans le troisième, l'été est humide et chaud, les orages sont fréquents; et malgré les désastres partiels occasionnés par ces météores, c'est l'état de l'atmosphère le plus favorable à la végétation.

La région comprise entre les deux courants se trouve en effet sur la limite méridionale du courant venu de l'Atlantique et chargé des vapeurs enlevées à la surface des mers. Tout accident, tout mouvement tournant, même faible, qui se produit au milieu de cette masse d'air se fait sentir à distance à la surface de la France, y amène les cumulus et ces longues traînées d'orages qui traversent toute la surface du territoire, en général du sud-ouest au nord-est, en présentant vers le nord-ouest une concavité très-prononcée.

Ces orages impressionnent peu le baromètre dans les points où ils passent. Les mouvements tournants auxquels ils se rattachent, étant eux-mêmes souvent très-peu énergiques, ne produisent en leur centre qu'une dépression barométrique peu considérable. C'est l'état général de l'atmosphère qui, dans de telles conditions, doit servir de guide, et la marche des instruments doit être l'objet d'un redoublement d'attention.

Les orages n'arrivent jamais avec un baromètre haut; ils surviennent en été avec un baromètre voisin de la hauteur moyenne, tantôt un peu au-dessus, tantôt un peu au-dessous. Plus on s'éloigne des mois les plus chauds, plus la hauteur du baromètre qui correspond aux orages descend au-dessous de la moyenne, parce que les mouvements tournants auxquels ils se rattachent doivent, pour les engendrer, être d'autant plus fortement accusés que l'air est plus froid. Ni dans l'hiver, ni dans l'été on ne voit se former d'orages au milieu du courant équatorial bien établi, mais seulement sur son bord méridional.

Une baisse très-modérée du baromètre, un thermomètre même médiocrement haut produisant un sentiment de chaleur étouffante, un hygromètre inclinant vers l'humide, de nombreux cumulus marchant lentement des régions ouest ou sud-ouest, sont les signes précurseurs de l'orage. Quand il approche, les cumulus s'étendent et s'abaissent; leur teinte neigeuse devient grise et plombée; une vive agitation s'y remarque. Si la couche des nuages inférieurs n'est pas trop

continue, on voit apparaître dans les intervalles qu'ils laissent entre eux des nuages plus élevés marchant dans des directions très-diversement inclinées sur celles des nuages les plus bas. Les uns et les autres obéissent aux mouvements des masses d'air dans lesquelles ils flottent, à moins que des réactions un peu énergiques ne s'exercent entre les électricités dont ils sont chargés.

Les nuages chargés de grêle se distinguent des nuages ordinaires par leur couleur d'un noir plombé, par leurs mouvements désordonnés, par un bruit caractéristique dû à l'entrechoquement des grêlons.

L'antagonisme entre le nord et le midi de la France existe pour les orages comme pour les pluies. Les bourrasques orageuses sont sans action sur la Méditerranée quand leur centre passe dans le nord de la France; s'il y pénètre par les côtes de Gascogne, dans la vallée de la Garonne et de la Dordogne, la bande orageuse peut se partager en deux, dont l'une remonte vers la Belgique, l'Allemagne ou la Suisse, suivant l'inclinaison primitive du courant, et dont l'autre descend sur la Méterranée en passant quelquefois par-dessus les départements qui la bordent. Les bourrasques orageuses qui traversent l'Espagne atteignent la Méditerranée, l'Italie, un peu les côtes françaises; elles sont sans action sur le nord de la France où elles peuvent, au contraire, activer les vents du nord-est et dessécher les plantes. Ce dernier effet peut être aussi produit lorsque des bourrasques atteignent le bassin occidental de la Méditerranée par l'Allemagne ou l'Autriche. Dans ce cas, la France est sur la limite du courant polaire de retour, le plus favorable à la continuation du beau temps, mais aussi le plus sec et le plus brûlant, bien que la sensation de la chaleur qu'il produit sur nous soit tempérée par l'activité qu'il donne à l'évaporation. »

6° LUMIÈRE ET CHALEUR RAYONNANTE.

Nous savons que les plantes ont besoin pour se développer d'une certaine quantité de chaleur; si cette quantité ne leur est pas fournie, ce qui arrive aux plantes transportées du midi vers le nord, elles s'étiolent et meurent. C'est la chaleur qui rend l'assimilation possible et qui entretient la circulation végétale.

Mais elle ne suffit pas seule au développement de la vie des plantes; la lumière du soleil leur est en outre nécessaire. On connaît aujourd'hui et nous avons exposé en son temps, l'équivalence de la chaleur et du travail mécanique; on sait qu'à la calorie, à l'unité de chaleur, correspond un travail de 425 kilogrammètres. La grande source de chaleur de l'univers, et par suite la grande source de force vive et de travail, c'est le soleil. C'est la chaleur du soleil qui vaporise l'eau, qui détermine les principales réactions chimiques de la vie végétale; c'est elle qui, emmagasinée dans les terrains perméables, s'y transforme en force vive et permet aux racines des végétaux de s'assimiler les éléments du sol.

Le rayonnement solaire est d'autant plus actif que le ciel est plus pur; le degré de pureté et d'éclairement du ciel exerce donc une grande influence sur la végétation et c'est cette influence qu'il serait intéressant de mesurer, car elle peut varier beaucoup d'une année à l'autre.

Les appareils qui servent à mesurer les radiations solaires sont les actinomètres (qui mesurent les rayons).

Le meilleur serait sans doute la pile thermo-électrique de Melloni, dont nous rappellerons le principe : lorsque l'on soude l'un à l'autre une série de barreaux composés alternativement d'antimoine et de bismuth, de manière à en former un faisceau de tiges parallèles ne se touchant que par leurs extrémités, toute différence de température entre les deux faces où existent les soudures détermine la production d'un courant électrique, qui se propage dans les fils de laiton attachés aux derniers éléments métalliques. Les fils de laiton aboutissent à un galvanomètre qui, par la déviation de son aiguille, mesure l'intensité du courant et cette intensité est d'autant plus grande que la différence des températures régnant sur les deux faces de la pile est elle-même plus considérable.

Cet appareil thermométrique est d'une sensibilité extrême. En dirigeant une des faces de la pile vers la partie du ciel occupée par le soleil, l'autre sera dirigée vers la terre et l'appareil marquera la différence entre l'intensité des radiations du soleil vers la terre et l'intensité des radiations de la terre vers le soleil.

On comprend toute l'importance qui s'attache à ce système d'observations ; malheureusement, l'appareil de Melloni est délicat et ne peut sortir des laboratoires. On a commencé à s'en servir à l'observatoire de Montsouris et il conduira sans doute à d'intéressants résultats.

Jusqu'à présent les radiations solaires ont été mesurées dans les observatoires au moyen de deux thermomètres conjugués. Deux thermomètres semblables sont enfermés dans un ballon de verre où l'on a fait le vide ; l'un est en verre blanc et transparent, l'autre a son réservoir en verre noir recouvert d'une couche de noir de fumée.

Le noir de fumée absorbe facilement la chaleur rayonnante ; aussi, lorsque l'appareil est exposé à la lumière solaire, le thermomètre noir s'échauffe plus que le thermomètre blanc et marque un degré plus élevé. La différence entre les deux thermomètres est d'autant plus considérable que le rayonnement solaire est plus vif, que le jour est plus pur ; cette différence est notée quatre fois par jour, à neuf heures du matin, à midi, à trois heures et à six heures du soir.

Si l'état du ciel n'apportait pas de perturbations dans les radiations solaires, elles auraient leur maximum à midi, au moment où le soleil est au point culminant de sa course, et leur maximum annuel au solstice d'été en juin. Mais l'état du ciel exerce une influence notable et déplace ces maximums tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

En juillet, août et septembre 1872, les différences moyennes entre les deux thermomètres conjugués de l'Observatoire ont été de 1°,24, 1°,28 et 1°,24.

M. Marié-Davy donne les instructions suivantes pour l'installation des thermomètres conjugués :

« Ces thermomètres sont renfermés chacun dans un tube de cristal, soufflé en boule à l'une de ses extrémités et scellé à la lampe à son autre extrémité après qu'on l'a vidé d'air. Les deux instruments sont placés à côté l'un de l'autre, dans une position horizontale, leur boule dirigée vers le midi, ou dans une position verticale, la boule en haut, quand le constructeur a eu la précaution de laisser un peu d'air dans le tube thermométrique de chacun d'eux pour empêcher la colonne de mercure de se diviser. On les installe sur un piquet, à hauteur d'œil, en plein soleil et loin de tout abri, sans les garantir de la pluie. Pendant le jour, le thermomètre noir indique toujours une température plus élevée que le thermomètre nu : c'est la différence des deux températures observées au même

moment qui donne la mesure de l'intensité des radiations. Comme la lumière nous vient non-seulement directement du soleil, mais de tous les points du ciel, il est nécessaire qu'aucune partie du ciel ne soit cachée aux deux thermomètres. »

Une simple observation fera comprendre l'intérêt des observations actinométriques : supposez qu'au 1er juin la quantité de chaleur rayonnante reçue depuis le commencement de l'année soit égale à celle qui avait été reçue l'année précédente, du 1er janvier au 20 juin, l'année nouvelle sera en avance de vingt jours au point de vue de la végétation sur l'année précédente et le météorologue pourra fournir à l'agriculteur de précieux renseignements.

La différence des deux thermomètres conjugués se transforme en degrés actinométrique au moyen d'une table spéciale et d'une formule qu'on trouvera à l'*Annuaire météorologique de* 1875. Malheureusement, les constantes de la formule ne sont pas encore nettement établies et quelques années d'expériences sont nécessaires pour qu'on puisse obtenir des résultats méritant une absolue confiance.

7° ÉVAPORATION.

L'évaporation qui se produit à la surface des mers et des continents est beaucoup plus considérable qu'on ne le supposerait au premier abord. Elle restitue à l'atmosphère la plus grande partie de l'eau pluviale, et la portion de pluie qui, par les fleuves, retourne à la mer est relativement beaucoup moindre que celle qu'entraîne l'évaporation.

On peut considérer l'évaporation sous trois aspects distincts : 1° évaporation à la surface des eaux; 2° évaporation à la surface du sol; 3° évaporation ou plutôt exsudation à la surface des plantes.

1° Évaporation à la surface des eaux. — L'évaporation à la surface des eaux dépend de plusieurs causes variables : la nature et la grandeur des vases employés, l'intensité de la chaleur reçue du soleil, et surtout la vitesse et l'humidité du vent.

Autant il est facile d'apprécier exactement la hauteur de pluie qui tombe, autant il est difficile de connaître la quantité d'eau qui peut s'évaporer pendant un certain temps, sur une surface donnée. Deux évaporomètres voisins conduiront à des résultats tout opposés.

Si l'air en contact avec la surface liquide n'est pas saturé, l'évaporation sera proportionnelle à la différence entre la tension maxima de la vapeur d'eau prise à la température de la surface liquide et la tension de la vapeur contenue dans la tranche d'air en contact. Cette tranche d'air une fois saturée, l'évaporation s'arrêterait.

Mais la tranche d'air en contact ne reste pas immobile; suivant l'agitation de l'atmosphère elle se renouvelle un plus ou moins grand nombre de fois par unité de temps; plus elle se renouvelle, plus l'évaporation est active.

On comprend d'après cela qu'un vent violent et sec peut déterminer une abondante évaporation.

La quantité d'eau pure qui s'évapore à la surface d'un bassin paraît être sensiblement proportionnelle à la surface de ce bassin, toutes choses égales d'ailleurs.

Évaporomètres. — L'évaporomètre le plus simple consistera donc en un bassin cylindrique de $0^m,20$ de diamètre, recouvert d'un léger grillage en fil de fer, et abrité de la pluie par des planchettes horizontales. Une profondeur de $0^m,10$ à $0^m,15$ suffit; on mesure chaque jour l'eau évaporée en versant dans le bassin, avec un vase gradué, assez d'eau pour ramener le niveau à l'affleurement d'une pointe fixe.

Le volume d'eau qu'on a versé une fois connu, la hauteur à laquelle il correspond dans le bassin s'en déduit immédiatement, au moyen d'une table dressée une fois pour toutes. D'après M. Renou, on obtient pour l'affleurement des résultats d'une certitude presque mathématique en se servant de pointes dorées ou garnies de platine, plongées entièrement dans l'eau et regardant en haut : le contact de ces pointes avec la surface liquide s'évalue au moins aussi exactement que celui de la pointe d'ivoire avec le mercure.

Évaporomètre Piche.— A Montsouris et dans les observatoires météorologiques, on se sert de l'évaporomètre Piche, dont voici la description prise dans l'*Annuaire météorologique de* 1874 :

« L'évaporomètre Piche donne des résultats plus comparables, et il a, en outre, l'avantage d'être d'un prix peu elevé et d'un maniement très-facile. Il se compose d'un tube de verre de $0^m,01$ environ de diamètre, de $0^m,30$ à $0^m,35$ de long. A l'un de ses bouts, le tube est fermé et terminé par un anneau qui sert à le suspendre. L'autre extrémité, ouverte, est munie d'une boucle de fil de laiton faisant ressort et destinée à maintenir un disque de papier buvard fixé à l'extrémité du tube.

« L'instrument doit être suspendu à côté des thermomètres et sous leur abri. Pour le mettre en expérience, on redresse le tube, l'ouverture en haut, on verse dans le tube de l'eau ordinaire à la température extérieure, on place entre le tube et la boucle de laiton un disque de papier neuf qu'on serre légèrement au moyen du ressort et qu'on a percé en son centre d'un trou d'épingle, on redresse le tube et, quand le papier est mouillé dans toute son étendue, on note la division à laquelle s'arrête l'eau. A l'heure de l'observation suivante, on répète cette lecture : la différence donne la hauteur de l'eau évaporée. Il convient de renouveler le papier tous les jours, le matin ou le soir, et de faire la lecture deux fois par jour, le matin et le soir, si l'on veut évaluer séparément l'évaporation de la nuit et celle du jour; dans le cas contraire, on peut se contenter d'une seule lecture faite au moment où l'on remplit d'eau l'appareil et où l'on change le papier.

« Le tube est gradué de manière que chaque division corresponde à un dixième de millimètre d'eau évaporée sur lasurface libre du papier. Cette surface doit donc être constante; aussi les disques sont-ils coupés à l'emporte-pièce et livrés en même temps que l'instrument.

« L'évaporomètre Piche se prête facilement aux observations les plus variées sur l'évaporation sous bois ou hors bois, dans des lieux secs ou humides, abrités ou exposés à tous les vents. »

Expériences sur l'évaporation. — On a cherché à établir une équation d'équilibre entre l'évaporation et la pluie à la surface du globe terrestre. Bien que cette équation n'offre guère d'intérêt ni de certitude, il est bon de la reproduire ici :

Appelons S la surface des mers.
P la hauteur de pluie qu'elles reçoivent.
e la hauteur d'eau qu'elles abandonnent par évaporation.

S' la surface des continents.
P' la hauteur de pluie qu'ils reçoivent.
α la proportion de cette pluie que la surface S' abandonne par évaporation.

La quantité d'eau pluviale reçue par le globe entier est égale à

$$PS + P'S'$$

la quantité évaporée est égale à

$$S.e + \alpha.P'S'$$

Égalant le gain et la perte et résolvant par rapport à (e) l'équation qui en résulte, nous trouvons :

$$e = \frac{PS + P'S'(1-\alpha)}{S}$$

Si l'on remarque que la surface des mers est égale à trois fois celle des continents, il faut faire :

$$S = 3S'$$

Et l'équation devient :

$$e = P + \frac{P'(1-\alpha)}{3}$$

Cette équation ne mène à rien, car on ne connaît pas la relation qui existe entre P et P', ni la valeur moyenne de α.

Si l'on suppose que la hauteur moyenne d'eau pluviale est la même sur terre que sur mer, c'est-à-dire si l'on fait ($P = P'$) et si l'on néglige l'évaporation α, c'est-à-dire si l'on admet que toute l'eau reçue par le sol gagne la mer, on trouve :

$$e = \frac{4}{3}P.$$

D'après cela, la quantité d'eau évaporée à la surface d'un bassin serait égale à une fois et un tiers la hauteur de pluie,

Mais α n'est pas nul, et si on le suppose égal à $\frac{1}{2}$, on trouve $e = \frac{7}{6}$ P.

Quoi qu'il en soit, il est certain que la tranche d'eau évaporée à la surface d'un bassin liquide est supérieure à la hauteur d'eau pluviale, reçue directement par ce bassin.

Les observations anciennes, rappelées par M. l'ingénieur Vallès dans une note insérée aux annales des Ponts et chaussées de 1850, donnent pour la mesure de l'évaporation les nombres suivants :

Évaporation moyenne à Paris.... $1^m,30$ à $1^m,50$ par an (Duleau 1827).

Dans son ouvrage sur les marais Pontins, de Prony constate que la quantité d'eau annuellement évaporée à Rome, résultant d'expériences faites pendant vingt années, est mesurée par une hauteur de $2^m,36$. La hauteur de la tranche d'eau pluviale annuelle ne dépasse guère le tiers de ce nombre.

Les ingénieurs chargés de rédiger les projets d'alimentation du canal de Nantes à Brest, ont admis $0^m,70$ de hauteur d'eau tombée et $1^m,46$ de hauteur d'eau évaporée.

Les observations faites à Nantes donnent 1 mètre pour la hauteur d'eau tombée et $1^m,81$ pour celle de l'eau évaporée.

Dans le projet d'alimentation du canal de jonction de la Sambre à l'Oise, M. Emmery a adopté pour mesure de l'évaporation une hauteur de $1^m,46$.

M. Comoy dit que, généralement, on évalue les pertes par évaporation à $0^m,004$ par jour, soit $1^m,46$ par an.

Mes observations personnelles, dit M. Vallès, me portent à admettre qu'à Marseille l'évaporation des eaux douces a pour valeur moyenne $2^m,50$.

Après une étude approfondie des phénomènes qui accompagnent la fabrication du sel, ajoute le même auteur, j'ai reconnu que l'évaporation des eaux de la Méditerranée, à la latitude de 43°, a pour mesure une tranche de $2^m,35$ à $2^m,40$ de hauteur.

L'évaporation doit être d'autant moins considérable que les pluies sont plus fréquentes. — A l'appui de ce raisonnement, on fait remarquer que quinze années d'observation à Turin ont donné une évaporation moyenne de $1^m,10$; en Piémont les pluies sont en effet fréquentes et abondantes.

M. l'ingénieur en chef Delaporte a procédé, de 1839 à 1845, à des expériences sur le canal de Bourgogne et a trouvé la moyenne suivante :

	SAINT-JEAN-DE-LOSNE.	DIJON.	POUILLY.
	mèt.	mèt.	mèt.
Altitude.	185	241	400
Hauteur moyenne annuelle de pluie.	0,86	0,75	0,80
Hauteur moyenne d'eau évaporée. . .	0,57	0,63	0,56

Les résultats seraient en désaccord avec les résultats généraux indiqués précédemment : les années de l'observation ont sans doute été remarquables par la fréquence des pluies. Il faudrait savoir en outre comment les bassins d'évaporation étaient situés par rapport aux vents régnants. — Si le vent ne pouvait en balayer la surface, il est clair que le séjour prolongé de l'air saturé au-dessus des bassins devait empêcher l'évaporation de se produire avec toute son intensité. Cependant les expériences de M. Delaporte semblent avoir été faites dans les meilleures conditions ; en les admettant comme bonnes, il en résulte que sous le climat du canal de Bourgogne la hauteur d'eau évaporée reste un peu inférieure ou au plus égale à la hauteur annuelle de pluie.

D'après les expériences exécutées pendant quarante années consécutives par le père Cotte, à Montmorency, la quantité annuelle d'eau évaporée serait de $0^m,70$, le vase étant tenu à l'ombre. Dans ce cas, elle serait de très-peu supérieure à la moyenne de la pluie.

Les nombres trouvés par les premières séries d'expériences sur le canal de Bourgogne ont été corroborés par ceux que M. l'ingénieur Tarbé a trouvés dans une seconde série d'expériences, de 1846 à 1850.

La moyenne des jours de pluie a été de 100 par année ;

La moyenne de la hauteur de pluie a été de.	$0^m,60$
— d'eau évaporée.	$0^m,60$

Le maximum d'évaporation s'est produit pendant les mois de juin et juillet e le minimum pendant les mois de novembre, janvier et décembre.

L'évaporation moyenne par jour a été de. . . . . $0^m,0015$

Le point d'observation était situé dans une vaste plaine formée par la rencontre des vallées de l'Yonne et de l'Armançon, à 85 mètres au-dessus du niveau de la mer, et la mesure de l'évaporation se faisait dans un bassin découvert exposé de tous côtés à l'action du soleil et des vents.

En ce qui touche la répartition de l'eau évaporée suivant les saisons, les séries d'expériences que l'on possède conduisent à des résultats différents.

Les chiffres moyens obtenus par le père Cotte sont :

HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE.
1	2,8	3,2	0,9

Quatorze années d'observation en Lombardie ont conduit à la proportion suivante :

HIVER.	PRINTEMPS.	ÉTÉ.	AUTOMNE,
1	1,8	2,1	1

Les quantités d'eau évaporées, comme l'a fait remarquer M. l'ingénieur Ruinet en discutant les nombres précédents, ne dépendent pas seulement des circonstances météorologiques, mais encore de la forme et des dimensions du bassin sur lequel on opère. Que l'on place à côté l'un de l'autre, par une forte chaleur, deux vases de grandeurs très-inégales; dans le plus petit l'eau s'échauffe d'avantage, l'évaporation sera plus forte. Dans celui qui sera moins profond, dans celui qui aura une section horizontale plus faible, l'influence des parois sera plus sensible; or, comme cette influence va en diminuant à mesure que le volume augmente, on peut dire, *à priori*, que, toutes circonstances égales d'ailleurs, dans un bassin d'expériences, l'évaporation obtenue sera d'autant moindre que l'appareil employé sera plus grand.

Au canal de Bourgogne, les expériences ont été faites avec des bassins de 2 mètres de côté au moins ; ceux des observatoires n'ont souvent que $0^{m},20$ de diamètre, et donnent par conséquent des chiffres beaucoup plus élevés.

Une expérience de M. l'ingénieur Ruinet l'a prouvé : il a installé près l'un de l'autre deux évaporomètres, l'un de 2 mètres, l'autre de $0^{m},30$ de côté; pendant le mois de mai 1851 l'évaporation a été de $0^{m},088$ sur le grand bassin et de $0^{m},134$ sur le petit; différence, $0^{m},046$.

Donc, l'évaporation qui a lieu à la surface d'une grande masse d'eau naturelle est loin d'être aussi forte que pourraient le faire croire les observations faites en petit.

Nous dirons, en terminant, avec M. Vallès :

« Tout ceci prouve combien il faut se méfier, dans les questions hydrauliques, des résultats d'observations faites même pendant une série d'années qu'on peut considérer comme suffisamment prolongée, et cette remarque vient à l'appui de celle que M. de Prony a consignée dans son ouvrage sur le desséchement des marais Pontins, que des phénomènes hydrauliques ont marché dans un certain sens pendant dix et quinze ans, pour reprendre ensuite une marche complétement différente dans les années suivantes. »

A l'observatoire de Montsouris, on se sert, avons-nous dit, de l'évaporomètre Piche; il a donné les résultats suivants pendant les années 1872-1873, 1873-1874 :

HAUTEUR MENSUELLE D'EAU ÉVAPORÉE (MILLIMÈTRES).

	1872-1873	1873-1874		1872-1873	1873-1874
Octobre.	58,2	52,1	Avril.	110,5	99
Novembre.	55,4	52,9	Mai.	121,7	110
Décembre.	48,3	22,4	Juin.	97,4	142,8
Janvier.	»	36,8	Juillet.	121,7	149,8
Février.	»	50,5	Août.	129,7	130,6
Mars.	85,5	80,6	Septembre. . . .	72,4	78,3

La hauteur totale évaporée en 1873-1874 est donc de 1005 millimètres.

Les mois de janvier et février 1873 manquent ; si on admet pour ces deux mois une évaporation égale à celle de janvier et février 1874, on trouve pour l'année 1872-1873 une hauteur totale d'eau évaporée égale à 988 milimètres. La différence entre les deux années est donc peu considérable.

En hiver, c'est de midi à trois heures du soir que l'évaporation est le plus considérable, mais le maximum se rapproche de midi; en été, l'évaporation a son maximum d'activité vers 3 heures du soir. En tout temps, c'est de minuit à 6 heures du matin que se produit le minimum d'évaporation.

2° ÉVAPORATION A LA SURFACE DU SOL.

L'évaporation à la surface du sol est soumise aux mêmes influences générales que l'évaporation à la surface des eaux : elle dépend surtout de la violence des vents, de leur degré d'humidité et de l'état du temps. Un autre élément important intervient dans la question, c'est la nature du sol, sa capacité d'absorption pour l'eau et la difficulté qu'il éprouve à se dessécher.

Dans une étude publiée en 1852 sur le drainage et sur ses rapports avec la météorologie et la géologie, M. de Villeneuve, ingénieur des mines, établissait que les lois de la filtration et de l'évaporation des eaux fournies à la terre par l'atmosphère sont la base rationnelle des travaux de drainage. En abordant ces travaux, il faut résoudre la question suivante :

Quelle est la nappe d'eau absorbée dans chaque climat par les terrains perméables analogues aux terrains drainés? Quelle partie d'eau pluviale est enlevée par l'évaporation?

La question a été étudiée en Angleterre par Dalton, Dickenson et Charnock, qui ont donné les nombres suivants :

	QUANTITÉ DE PLUIE.	ÉVAPORATION DE LA TERRE.	FILTRATION ABSOLUE.	FILTRATION P. 100 DE PLUIE.
Charnock.	629	503	126	20
Dalton.	852	638	214	25
Dickenson.	665	381	284	44

Il y a donc de grandes différences entre les trois observateurs, différences qui tiennent sans doute, non pas à des erreurs, mais à la variété des circonstances expérimentales.

Une expérience faite pendant l'année 1851, en France, dans le département de Seine-et-Marne, a donné les résultats suivants :

Quantité de pluie.. . 518 millim. Évaporation de la terre . . 453 millim.

Ici, la filtration pour cent de pluie n'est plus que de 12 $\frac{1}{2}$.

Si l'on construit pour chaque année la courbe des pluies en prenant les mois pour abscisses et si l'on construit aussi la courbe de l'eau mensuelle évaporée, celle-ci est intérieure à la première et les portions d'ordonnées comprises entre les deux courbes mesurent les quantités d'eau qui ont pénétré par filtration dans le sol et ne sont pas retournées dans l'atmosphère.

L'étude de ces courbes révèle une loi générale, que M. Belgrand a mise en lumière dans ces dernières années :

La filtration est abondante pendant les mois pluvieux et très-faible pendant les mois chauds ; inversement, l'évaporation, peu active pendant les mois humides, dévore la pluie pendant les mois chauds et ne la laisse pas descendre dans le sol. Les pluies d'hiver seules profitent aux nappes d'eau souterraines, les pluies d'été retournent rapidement dans l'atmosphère à l'état de vapeur.

C'est ce qui résulte des expériences suivantes de Dickenson et de Dalton :

MOIS.	NOMS DES OBSERVATEURS.	QUANTITÉ DE PLUIE.	EAU ÉVAPORÉE.	EAU QUI S'EST INFILTRÉE DANS LE SOL.
Janvier.	Dickenson.	47 millim.	14	33
	Dalton.	62	25	27
Juillet.	Dickenson.	58	57	1
	Dalton.	105,5	104	1,5

L'évaporation sera donc d'autant plus considérable dans un pays, que les pluies estivales seront elles-mêmes plus abondantes, puisqu'elles s'évaporent presque en entier.

Inversement, le complément de l'évaporation, la filtration qui alimente les nappes d'eau souterraines sera d'autant plus grande, que les pluies d'hiver auront été plus abondantes ; ce sont les seules qui profitent aux cours d'eau.

Charnock, dont nous citions tout à l'heure les expériences, opérait sur une terre continuellement saturée d'eau ; il a reconnu que l'évaporation de cette terre était inférieure à celle d'une égale surface de liquide, et cela se conçoit sans peine si l'on réfléchit que la vapeur d'eau s'échappe plus facilement lorsqu'elle n'est pas retenue par une affinité pareille à celle qu'exerce la terre sur l'eau, affinité qui va jusqu'à faire condenser une partie notable de la vapeur d'eau atmosphérique.

Cependant, pour que la proposition précédente soit vraie, il faut admettre que la masse liquide est exactement à la même température que la terre saturée. Souvent dans les mois chauds, après des chaleurs prolongées, la terre, qui possède pour l'absorption des rayons solaires une puissance supérieure à celle de l'eau, la terre a emmagasiné des quantités de chaleur considérables ; vienne une pluie, cette chaleur emmagasinée la vaporise rapidement, si bien que certaines pluies d'orage sont pour ainsi dire rendues à l'atmosphère aussitôt que reçues et peuvent tomber plusieurs fois de suite au même lieu sans pour cela laisser trace d'humidité à l'intérieur du sol. L'eau pure est restée en retard re-

lativement à l'échauffement de la terre et sa surface rend alors à l'atmosphère moins de vapeur que n'en rend la surface du sol.

L'infériorité de l'évaporation du sol par rapport à celle des surfaces liquides est donc vraie surtout dans les premiers mois de l'année ; à la suite des mois chauds, il peut se faire que l'évaporation de la terre atteigne et dépasse par moments celle de la surface des eaux.

L'influence des radiations solaires emmagasinées par la terre est encore mise en évidence par ce fait que la courbe d'évaporation de l'eau pure à l'ombre est toujours intérieure à la courbe d'évaporation de la terre saturée exposée au soleil.

Dans des expériences faites à Genève, une terre drainée a donné, pendant les mois de décembre, janvier et février, une vaporisation supérieure à celle de l'eau pure.

Pendant l'hiver, lorsque les gelées blanches sont fréquentes et que la terre, rayonnant sa chaleur vers les espaces célestes, se refroidit plus que l'air en contact avec elle, l'évaporation diminue et finit par s'annuler.

Suivant M. de Villeneuve, la diminution de l'évaporation de la terre peut aller jusqu'au point où l'évaporation devient négative, c'est-à-dire que la terre refroidie peut condenser la vapeur d'eau de l'atmosphère. La filtration peut alors produire plus d'eau que la pluie n'en a livré. Ce cas s'est présenté dans les observations d'un sol drainé faites par Dickenson, et on en a constaté aussi plusieurs exemples en France.

Le résumé des expériences connues, faites en Angleterre sur les terrains drainés, conduit aux nombres suivants :

La hauteur de pluie annuelle étant de	715	millimètres.
La quantité d'eau que conserve la terre est de.	210	—
Et la quantité d'eau évaporée qui retourne à l'atmosphère est de	505	—

Suivant la répartition des pluies dans le cours d'une année, les oscillations de part et d'autre de la moyenne se régleront d'après les circonstances énumérées plus haut.

Dans le bassin de la Seine, d'après M. Dausse, le débit général annuel de la Seine correspond à une couche de 120 millimètres d'eau répandue sur tout le bassin ; la hauteur moyenne de pluie étant de 600 millimètres, la part de l'évaporation atteindrait 480 millimètres. Ce nombre s'applique à la généralité des terrains; mais sur les terrains perméables l'évaporation est beaucoup plus considérable ; elle est moindre au contraire sur les terrains imperméables.

Si du climat séquanien, où les pluies d'été l'emportent sur les pluies d'hiver. nous passons au climat méditerranéen, qui présente les caractères inverses : pluies d'été inférieures aux pluies d'hiver, nous devons trouver une filtration relativement plus abondante. Dans la filtration se trouve comprise l'eau superficielle, dont la quantité est considérable sous le climat méditerranéen à cause de la forte inclinaison des versants et du grand nombre des cours d'eau torrentiels.

La filtration dans le bassin méditerranéen est 2,5 fois plus forte que dans le bassin séquanien; dans le plateau du Ventoux, qui alimente la source de Vaucluse, la filtration annuelle atteint 427 millimètres.

Si l'on admet qu'il tombe dans le bassin méditerranéen 600 millimètres de pluie par an, l'évaporation de la terre en consomme 276 millimètres et l'alimentation des cours d'eau prend le reste, soit 324 millimètres.

Il en résulte cette conclusion étrange au premier abord : c'est que les terres du climat méditerranéen sont plus sujettes que celles du nord de la France à être envahies pendant l'hiver par un excès d'humidité et que l'opportunité du drainage s'y fait plus vivement sentir en beaucoup de points.

3° ÉVAPORATION PAR LES PLANTES.

La terre saturée et non recouverte de végétation présente une évaporation analogue à celle de la surface des eaux, avec les différences que nous avons exposées plus haut.

Pour la terre recouverte de plantes, le phénomène se modifie complètement ; la portion du sol qui n'est pas occupée par les tiges évapore librement, mais l'évaporation y est beaucoup moins active que sur un sol dénudé, car la surface est protégée contre le vent et les ardeurs du soleil par la végétation qui la surmonte. La quantité d'eau qui s'échappe directement par la surface du sol est donc minime; celle que restitue à l'atmosphère la transpiration des plantes est au contraire fort considérable. L'eau est le véhicule qui va chercher dans le sol les éléments constitutifs des plantes et les apporte jusque dans la tige et les feuilles : la chaleur solaire détermine à la surface des végétaux une abondante évaporation qui se traduit dans les canaux intérieurs par une aspiration d'autant plus énergique, que la chaleur solaire est plus vive.

Les expériences sur ce que l'on peut appeler l'évaporation cutanée des végétaux sont peu nombreuses ; les plus sérieuses ont été entreprises en 1873 à l'Observatoire de Montsouris, et elles ont conduit rapidement à des résultats curieux et inattendus.

« Il faut au blé, dit M. Marié-Davy, une quantité déterminée de carbone et d'hydrogène, d'azote et de diverses substances minérales ; l'air et le sol sont chargés de les lui fournir; mais, alors même que ces substances existeraient à la portée de la plante en quantité supérieure à ses besoins, elles resteraient sans effet s'il ne s'y joignait pas l'eau nécessaire à leur préparation et à leur introduction dans l'appareil végétal, puis au transport des principes élaborés par les feuilles dans les organes destinés à leur donner leur composition définitive. Trop souvent, dans les champs d'essai, l'application des engrais prescrits par les données de la chimie agricole est restée sans grande utilité appréc.able, parce que l'eau n'est pas intervenue dans les proportions nécessaires. »

Toutes les plantes renferment en eau une notable partie de leur poids ; mais cette partie est peu de chose comparée à celle qui s'exhale des feuilles par le mécanisme de la végétation.

Woodward, au dix-huitième siècle, plaça des plantes aquatiques dans des vases pleins d'eau et recouverts d'un disque ne laissant passage qu'à la plante ; il reconnut par des pesées que, pour un gramme d'acroissement de la plante il fallait consommer :

214	grammes	d'eau distillée.
170	—	d'eau de source.
176	—	d'eau de pluie.
96	—	d'eau de la Tamise.
52	—	d'eau de Hyde-Park avec 18 grammes de terre de jardin.
40	—	d'eau de Hyde-Park concentrée par évaporation.

Cette série montre que la plante consomme d'autant plus d'eau que celle-ci est plus pure et moins chargée d'engrais. Les engrais économisent la consommation de l'eau ; c'est un fait que nous retrouverons tout à l'heure sous une forme plus précise encore.

Les expériences de Hales montrèrent que les arbres verts évaporent moins que les arbres à feuilles caduques ; cette circonstance, vérifiée depuis, indique pourquoi les arbres verts vivent dans des sols arides où l'eau manquerait pour les autres essences.

M. Duchartre a étudié avec soin le rôle de l'eau dans la végétation : il a reconnu d'abord que l'eau était surtout puisée dans le sol et s'introduisait par les extrémités des racines, extrémités dont le tissu se prête à une absorption considérable. Cette eau va s'évaporer dans l'atmosphère ; mais l'opération inverse, absorption de l'humidité de l'atmosphère par les plantes, est beaucoup moins active et ne se produit sans doute qu'accidentellement, lorsque la plante, épuisée par une chaleur sèche, se trouve ensuite baignée dans une atmosphère humide.

Quoi qu'il en soit, il est difficile d'évaluer séparément les deux sources d'alimentation en eau ; ce qui est certain, c'est que l'évaporation et l'exsudation des plantes sont incomparablement plus actives à la lumière solaire qu'à l'ombre ou dans l'obscurité.

Les expériences de M. Dehérain ont conduit aux résultats suivants pour le blé et l'orge.

Le poids de l'eau transpirée en 1 heure pour 1 gramme des plantes a été :

Pour le blé.	soleil, température.	28°	0gr,882	Pour l'orge.	Soleil, température.	19°	0gr,742
	Lumière diffuse.. .	22°	0gr,177		Lumière diffuse.. .	16°	0gr,180
	Obscurité.	22°	0gr,011		Obscurité..	16°	0gr,023

D'après Risler, les plantes ci-après dénommées consomment chaque jour des hauteurs d'eau qui, exprimées en millimètres, sont de :

3,4	à	7	millimètres	pour la luzerne et les prairies.
3	à	5	—	pour l'avoine.
3	à	4	—	pour le maïs.
2,8		»	—	pour le blé.
3		»	—	pour le trèfle.
0,9	à	1,3	—	pour la vigne.
0,5	à	1,1	—	pour le sapin.
0,5	à	0,8	—	pour le chêne.

Considérons du blé enlevant 2mm,8 par jour, du 1er avril au 1er août, c'est-à-dire pendant 120 jours environ, il enlèvera au sol 336 millimètres d'eau ; si l'on veut se reporter aux tableaux que nous avons donnés précédemment, on reconnaît que, pendant ce temps, la pluie moyenne n'est que de 200 millimètres. Le blé aura donc puisé, dans les réserves que contiennent les profondeurs du sol, environ 14 centimètres de hauteur d'eau, ce qui aura desséché la terre sur une profondeur beaucoup plus considérable.

Les résultats précédents montrent toute l'importance qui s'attache à la recherche des diverses quantités d'eau consommées pour produire un poids donné de telle ou telle récolte. Aussi est-ce avec raison que l'habile directeur de l'ob-

servatoire de Montsouris, M. Marié-Davy, a placé cette étude parmi les plus urgentes.

Ses expériences n'ont commencé qu'en 1873, et nous allons en résumer rapidement les résultats d'après la notice insérée à l'*Annuaire météorologique* de 1875.

La première série d'expériences, faites en 1873, avait conduit à ce résultat que. depuis sa germination jusqu'à sa maturité, le blé évaporait 1,796 fois son poids d'eau.

Le blé soumis à l'expérience avait été semé dans de la terre du parc de Montsouris dénuée d'engrais et arrosée chaque jour.

Ainsi, 1 hectolitre de blé, pesant 80 kilogrammes, consommerait d'après cela 144,000 kilogrammes d'eau, et un rendement de 30 hectolitres à l'hectare enlèverait à la terre une tranche d'eau de 0m,432.

Ajoutez à cette tranche celle qui résulte de l'évaporation directe du sol pendant toute l'année, et vous arrivez à un total qui dépasse la hauteur de pluie. Les réserves du sol seraient donc de plus en plus attaquées par la production du blé, dont le développement se trouverait ainsi limité.

Mais ces premières expériences, faites dans des conditions qui ne sont pas celles de la nature, et avec une terre dépourvue d'engrais, ne pouvaient être généralisées, et il était nécessaire de procéder à des essais comparatifs. C'est ce qui fut fait en 1874.

La terre était placée dans des vases en zinc ou en terre émaillée sans ouverture au fond ; chaque jour on pesait le vase et son contenu et on obtenait ainsi le poids de l'eau disparue, qu'on remplaçait par une quantité égale ; un second vase semblable, mais où l'on n'avait semé aucune graine, donnait le poids de l'eau directement évaporée par le sol ; par différence, on obtenait le poids de l'eau évaporée par la plante.

Pour le blé, le rapport du poids de l'eau évaporée au poids du grain produit a été de :

1550 avec une terre dépourvue d'engrais.
1000 avec une terre à laquelle on avait ajouté un engrais complet.
890 avec un engrais liquide mélangé du dixième de son poids de terreau.

C'est donc le terreau mélangé d'engrais liquide qui a déterminé la moindre consommation d'eau.

Ainsi, la moindre quantité d'eau qu'il faille enlever au sol pour produire 1 kilogramme de blé est d'environ 1,000 kilogrammes, si l'on ajoute à ce qu'évapore la plante ce qui est évaporé directement par le sol.

Un rendement de 50 hectolitres de blé à l'hectare, représentant un poids de 4,000 kilogrammes, consommera donc 4 millions de kilogrammes d'eau, ce qui représente une tranche liquide de 0m,40 de hauteur. Ajoutez à cela l'eau directement évaporée par le sol, et vous arrivez à un total de 0m,60, souvent supérieur à la quantité de pluie qui tombe à Paris dans une année.

Nous le répétons, ces expériences sont des plus intéressantes ; elles sont trop peu nombreuses encore pour qu'on en puisse tirer des conclusions absolues ; elles font grand honneur à l'observatoire de Montsouris qui, par ce genre d'études, pourra rendre à l'agriculture de précieux services.

Cette influence de l'eau dans la végétation est nettement résumée dans les quelques lignes suivantes de M. Marié-Davy :

« La fertilité d'une terre n'a donc rien d'absolu ; elle change de base suivant les climats, et même d'une année à l'autre, suivant la somme de chaleur, de lumière et d'eau que reçoit cette terre. La quantité d'eau nécessaire n'a rien non plus d'absolu ; elle dépend de la somme de matières dont l'eau peut se charger et de l'état d'équilibre existant entre leurs quantités individuelles.

« Dans une certaine mesure, l'eau peut suppléer aux engrais en dehors même de ceux qu'elle apporte avec elle. Par contre, il est des engrais qui, étant bien appropriés à la terre où on les met, produisent une économie très-notable dans la masse d'eau consommée. Il y a là une question de balance entre les prix de revient de l'eau et de l'engrais. On comprend toutefois combien il importe de conserver dans le sol la plus forte provision d'eau possible dans les couches profondes, quand elle gêne à la surface. Alors même que les racines n'iraient pas l'y chercher, cette eau en remonte par voie de capillarité et en retire avec elle des produits minéraux utiles à la plante. Approfondir la couche arable ameublie par la charrue, c'est augmenter la capacité de saturation du sol par l'eau, c'est y favoriser l'accès de l'air et des gaz qui aident à la dissolution des principes minéraux ; c'est accroître la somme de ces principes que la terre peut fournir naturellement selon ses ressources permanentes et sans s'épuiser ; mais comme le rendement croit encore plus vite, il faut que les apports d'engrais viennent compenser les pertes. »

8° MAGNÉTISME TERRESTRE.

Lorsqu'une aiguille aimantée est posée sur un pivot qui en supporte directement le centre de gravité, de telle sorte que cette aiguille soit en équilibre et puisse tourner librement sur son pivot, elle se place dans une direction fixe, et, si on l'en écarte, elle y revient toujours après un certain nombre d'oscillations.

Cette direction fixe, qui va sensiblement du nord au sud, est ce qu'on appelle le méridien magnétique. C'est toujours la même moitié de l'aiguille qui regarde le nord, et la même moitié qui regarde le sud ; à la première correspond le pôle Nord, à la seconde correspond le pôle Sud.

On a bien vite reconnu toute l'importance que les propriétés de l'aiguille aimantée présentent pour le navigateur ; il est précieux, en effet, de connaître à chaque instant une ligne qui reste immuable de direction quels que soient les mouvements du navire qui la porte. C'est le principe de la boussole ; pour l'étude de cet appareil, le lecteur se reportera aux parties de notre *Manuel* qui traitent de la physique et du lever des plans.

On explique le phénomène de l'aiguille aimantée par l'existence hypothétique d'un aimant terrestre, sensiblement dirigé suivant la ligne des pôles ; c'est une hypothèse que rien ne justifie et qui doit être abandonnée.

Déclinaison. — L'aiguille aimantée n'est pas exactement dirigée du nord au sud, c'est-à-dire qu'elle n'est pas comprise dans le méridien géographique du lieu d'observation ; le plan vertical qui la contient, le méridien magnétique, fait avec le méridien géographique un angle qu'on appelle la déclinaison de l'aiguille aimantée au lieu considéré.

La déclinaison se mesure donc par l'angle que fait la direction de l'aiguille avec la direction de la méridienne tracée sur le sol.

Dans notre hémisphère, suivant que la moitié de l'aiguille qui regarde le nord est à l'ouest ou à l'est de la méridienne, on dit que la déclinaison est occidentale ou orientale.

Avant 1666, la déclinaison à Paris était orientale ; en 1622, elle était de 6° 30′, et de 4° 16′ en 1634 ; en 1666 elle s'annula, c'est-à-dire que l'aiguille aimantée se confondit avec la méridienne.

Depuis cette époque, la déclinaison est occidentale ; elle était, en 1680, de 2° 40′, en 1700, de 8° 12′, en 1720, de 13°, en 1740, de 15° 30′, en 1760, de 18° 30′, en 1780, de 20° 35′, en 1798, de 22° 15′ ; son maximum fut atteint vers 1814, où l'on nota une déclinaison de 22° 34′.

Depuis cette époque, la déclinaison diminue tout en restant occidentale : en 1825, elle était de 22° 13′, en 1835, de 22° 4′, en 1850, de 20° 32′, en 1860, 19° 22′, en 1871, 17° 33′.

Quant aux variations mensuelles et diurnes de la déclinaison, on s'en rendra compte par le tableau suivant qui se rapporte à l'année météorologique 1872-1873 :

NOMBRE DE MINUTES DONT LA DÉCLINAISON DÉPASSAIT 17°

AUX HEURES SUIVANTES :

	6 HEURES MATIN.	9 HEURES MATIN	MIDI.	3 HEURES SOIR.	6 HEURES SOIR.	9 HEURES SOIR.	MINUIT.
Octobre.	15	15	25	23	19	16	16
Novembre.	17	17	23	22	20	16	16
Décembre.	18	18	21	22	19	17	17
Janvier.	20	20	24	25	22	18	18
Février.	18	18	23	23	21	19	16
Mars.	15	16	26	25	20	18	16
Avril.	16	17	28	27	22	19	19
Mai.	17	18	26	26	22	20	18
Juin.	21	22	30	31	27	24	24
Juillet.	25	27	37	37	33	29	28
Août.	27	29	37	36	30	26	29
Septembre.	28	28	36	33	29	27	28

De ce tableau on peut conclure que l'aiguille aimantée reste à peu près immobile pendant la nuit ; à partir du lever du soleil, elle s'écarte davantage vers l'ouest ; l'écartement maximum a lieu vers midi, puis l'aiguille revient vers l'est.

On construit des mappemondes sur lesquelles sont tracées les courbes d'égale déclinaison ; on les trouvera dans les traités de physique. Du reste, elles ne peuvent être encore bien exactement déterminées.

D'après les chiffres que nous venons de donner, la déclinaison est affectée de perturbations séculaires, dont la courbe est régulière, perturbations qui tiennent sans doute au mouvement complexe de notre globe.

Elle est affectée en outre de perturbations mensuelles et diurnes assez régulières qui paraissent dues à l'influence de la chaleur solaire.

On observe en outre des perturbations accidentelles, brusques et considérables, qui coïncident avec les aurores boréales, qui, par là, se rattachent aux grands mouvements de l'atmosphère, et qui, par conséquent, ont leur part d'action dans les variations des climats et du temps.

L'étude de la déclinaison de l'aiguille aimantée peut donc conduire à d'importants résultats ; malheureusement, elle exige des appareils coûteux et perfectionnés ; elle mesure des quantités très-petites et difficiles à apprécier exactement. On ne peut donc l'aborder que dans nos grands établissements publics, et il faudra sans doute de patientes recherches pour découvrir les lois qui rattachent le magnétisme terrestre aux grands mouvements de l'atmosphère.

Inclinaison. — Une aiguille aimantée, étant placée dans le plan du méridien magnétique et libre d'osciller autour d'un axe horizontal qui contient son centre de gravité et par rapport auquel elle se trouve en équilibre, ne reste pas indifféremment dans une position quelconque. Elle adopte une position déterminée, et lorsqu'on l'en écarte, elle y revient après quelques oscillations. L'angle fixe de l'aiguille avec l'horizon est ce qu'on appelle l'inclinaison.

Si le plan vertical qui contient l'aiguille s'écarte du méridien magnétique, l'aiguille aimantée se rapproche peu à peu de la verticale ; elle devient verticale lorsque son plan fait un angle de 90° avec le méridien magnétique.

Depuis qu'on l'observe, l'inclinaison a subi les variations suivantes :

ANNÉES.	DEGRÉS.	ANNÉES.	DEGRÉS.	ANNÉES.	DEGRÉS.
1780.	71°,48′	1798.	69°,51′	1810.	68°,50
1819.	68°,21′	1829.	67°,45′	1835.	67°,24
1850.	66°,44′	1859.	66°,11′	1873.	65°,28

On voit que les variations séculaires sont bien plus lentes que celles de la déclinaison.

Il y a aussi des variations diurnes, faibles et régulières, mais qui ne peuvent être exactement observées qu'avec d'excellents appareils. On remarque un maximum de l'inclinaison qui se produit chaque jour entre 3 et 8 heures du matin, et un minimum qui se produit entre 2 et 5 heures du soir. L'amplitude de l'oscillation est de 3 à 4 minutes.

Gauss et Weber ont construit sur des mappemondes des courbes d'égale inclinaison, qui, jusqu'à présent, n'ont pas été d'une grande utilité. Quand on s'avance vers le pôle Nord, l'inclinaison augmente et l'aiguille se rapproche de la verticale ; l'amiral Ross a trouvé dans les mers polaires, vers 75° de latitude nord, un point où l'aiguille aimantée reste verticale. Dans l'hypothèse de l'aimant terrestre, ce point est le pôle magnétique Nord de la terre.

Dans le voisinage de l'équateur, on trouve une série de points où l'inclinaison est nulle, l'aiguille aimantée reste horizontale ; la courbe qui relie ces points s'appelle l'équateur magnétique.

Quant au pôle magnétique Sud de la terre, il se trouve dans l'autre hémisphère, vers 60° 30′ de latitude.

S'il est important de mesurer la déclinaison et l'inclinaison, qui permettent de déterminer la direction du couple magnétique terrestre, il ne l'est pas moins de déterminer les variations de la force magnétique elle-même ; ces variations, qui doivent avoir leur influence, s'observent par divers procédés dont la description sortirait du cadre de notre ouvrage.

A l'appui de l'influence exercée par le magnétisme sur les phénomènes atmosphériques, nous reproduisons, d'après le *Journal officiel*, un extrait de la séance de l'Académie des sciences du 15 novembre 1875 :

« M. Marié Davy, directeur de l'observatoire de Montsouris, adresse une note relative aux tempêtes du 6 au 11 novembre 1875.

Les bourrasques tournantes qui ont sévi sur la France dans les premiers jours de novembre ont présenté une intensité croissante du 6 au 11 pour arriver, le 11, à un degré d'énergie assez rare à Paris, bien qu'il soit loin d'égaler ce que l'on observe en mer.

L'anémomètre enregistreur de M. Hervé-Mangon, installé à Montsouris par M. Charles Sainte-Claire Deville, a donné à M. Marié-Davy les maximums suivants : le 6, entre 7 et 8 heures du soir, 54 kilomètres à l'heure, ce qui correspond à une pression de 27 kilogrammes par mètre carré. Le 8, vers 8 heures du matin, 68 kilomètres à l'heure, ce qui correspond à une pression de 44 kilogrammes par mètre carré. Le 10, vers 9 heures et demie du matin, 88 kilomètres à l'heure, ce qui correspond à une pression de 73 kilogrammes par mètre carré.

Après un calme plat qui a duré de 10 h. 50 à 11 h. 30 du soir, le 10, et pendant lequel la pluie est tombée en abondance, le vent a repris avec une nouvelle force. Vers 7 heures du matin, le 11, le moulinet Robinson a été enlevé dans une rafale et l'anémomètre a cessé d'enregistrer la force du vent. Mais la veille, M. Marié-Davy avait pu installer un nouvel enregistreur des pressions, construit par M. Bréguet. L'une des aiguilles indicatrices a été à plusieurs reprises lancée hors des limites des cylindres enregistreurs, et, bien que la graduation de l'instrument ne soit pas achevée, M. Davy estime que la pression a dû dépasser 80 kilogrammes par mètre carré, ce qui correspondait à une vitesse de 80 kilomètres à l'heure ou de 26^{m},4 par seconde.

A chacun de ces coups de vent, dit M. Marié-Davy, correspond un minimum barométrique, et le 11, à 6 heures du matin, le mercure était descendu à 728 millimètres à l'observatoire de Montsouris.

Dès le 1er novembre, l'observation des nuages élevés accusait un mouvement de translation des couches supérieures de l'air dans le sens de l'ouest à l'est, alors que les vents inférieurs marchaient encore dans la direction opposée. Ainsi qu'on l'a souvent constaté à Montsouris, ces fortes perturbations atmosphériques ont été précédées, de plusieurs jours, par des perturbations magnétiques survenues les 28 et 29 octobre, les 1, 2, 3 et 4 novembre.

Celle du 2 a été très-forte et a revêtu la forme caractéristique des tempêtes qui nous menacent directement; ces signes disparaissent, en général, quand la tempête annoncée sévit sur nos côtes et n'est pas suivie par d'autres. La perturbation s'est produite le 8; pendant la tempête du 11 et dès le 11, les boussoles nous faisaient pressentir la tempête du dimanche 14 novembre.

L'existence de relations plus ou moins directes entre les mouvements de l'aiguille aimantée et les variations de temps a été admise depuis le commencement du siècle par divers météorologistes.

M. Marié-Davy en avait entrepris les recherches en 1864 et 1865, mais avec des moyens trop trop limités. La grande publication américaine du général Myer des États-Unis lui permettra de reprendre cette étude dans des conditions meilleures. L'aiguille aimantée, conclut M. Marié-Davy, par la généralité de ses indications, est l'instrument le plus précieux que les météorologistes puissent appliquer à la prévision du temps à courte échéance. »

9° ÉTAT ÉLECTRIQUE DE L'ATMOSPHÈRE.

Si nous réfléchissons à l'influence que les phénomènes électriques exercent sur les animaux et sur les composés chimiques, nous devons nous dire que leur action doit être puissante aussi sur les gaz de l'atmosphère et sur les végétaux dont ces gaz sont le principal aliment.

La recherche de l'état électrique de l'atmosphère est donc intéressante. L'état électrique se constate au moyen d'électroscopes sensibles, dont les lames sont mises en communication avec une tige qui s'élève dans l'atmosphère.

Ces appareils montrent que l'atmosphère est toujours chargée d'électricité; par un temps calme et serein, cette électricité est positive; elle a deux maximums, l'un à dix heures du matin, l'autre à dix heures du soir, et deux minimums, l'un à deux heures du matin, l'autre à deux heures de l'après-midi. Il faut attribuer la production de l'électricité atmosphérique à l'évaporation et aux réactions de toute nature qui se passent à la surface de la terre.

Lorsque arrivent les perturbations atmosphériques, les orages, l'électricité de l'atmosphère est tantôt positive, tantôt négative. Les nuages, en se formant, se chargent de l'électricité positive de l'atmosphère; mais qu'un nuage fortement chargé vienne à se trouver en regard d'un autre nuage très-peu chargé, comme les électricités de même nom se repoussent tandis que celles de nom contraire s'attirent, l'électricité positive du nuage le moins chargé sera tout entière refoulée; en même temps le fluide neutre de ce nuage sera décomposé, le fluide négatif sera attiré sur la face qui regarde le premier nuage et le fluide positif repoussé. Que le nuage dans cet état vienne, par une cause ou une autre, à être mis en communication avec la terre, il perd son fluide positif et conserve son fluide négatif attiré par le nuage opposé. Que l'attraction cesse par l'éloignement des deux nuages, l'un restera chargé de fluide positif, l'autre de fluide négatif.

L'éclair est l'étincelle électrique qui jaillit, soit entre la terre et un nuage électrisé, soit entre deux nuages électrisés en sens contraire ou inégalement électrisés.

Mais nous ne nous étendrons point sur ces phénomènes que nous avons exposés en physique, en même temps que nous traitions des effets de la foudre et de la construction des paratonnerres.

Les électroscopes à balles de sureau ou à feuilles d'or sont très-sensibles et suffisent à déceler l'état électrique de l'atmosphère; mais ils ne donnent pas le principal élément de la question : l'intensité électrique. Les électromètres sont des appareils délicats et encore peu connus; l'observatoire de Montsouris a commencé à se servir des électromètres, il faut attendre le résultat de ses études.

Ozone. — L'oxygène soumis à l'action de l'électricité, celui qu'on recueille au pôle positif de la pile pendant la décomposition de l'eau sous l'influence d'un courant voltaïque, possède une odeur caractéristique, qui se manifeste aussi dans l'air traversé par la foudre.

Cet oxygène ainsi modifié, découvert par Schœnbein, en 1840, porte le nom d'ozone (du grec ὄζη, odeur). L'ozone a des propriétés oxydantes très-énergiques; humide, il oxyde les métaux, tels que l'argent et le mercure, il transforme les acides sulfureux et azoteux en acides sulfurique et azotique; il oxyde l'azote en

présence des bases puissantes et donne des azotates, etc.; il brûle les matières organiques, il décompose l'iodure de potassium comme le ferait le chlore, c'est-à-dire qu'il met l'iode en liberté.

De cette réaction découle la fabrication du papier ozonoscopique, dont on se sert pour rechercher l'ozone. Si l'on imbibe d'iodure de potassium un papier amidonné, et qu'on le porte dans une atmosphère renfermant de l'ozone, un peu d'iode est mis en liberté et, comme ce corps colore l'amidon en bleu, la présence de l'ozone se trouve immédiatement signalée par la coloration du papier; on peut même établir une gamme de couleurs qui permet d'apprécier à peu près la quantité de l'ozone d'après l'intensité de la coloration bleue.

Lorsqu'on expose le papier amidonné à l'influence de l'atmosphère, il se colore peu à peu; on en a conclu la présence de l'ozone dans l'air. La conclusion peut être erronée, car les vapeurs nitreuses, les huiles essentielles qu'exhalent les végétaux, la lumière solaire même peuvent bleuir le papier ioduré et amidonné.

Cependant, lors des orages, la coloration du papier ozonoscopique est très-sensible, de sorte que les indications de ce papier ne sont pas à négliger au point de vue météorologique.

M. Marié-Davy a fait entreprendre une série d'observations à ce sujet et a reconnu que le papier ozonoscopique est fortement impressionné par les cyclones dont le centre de dépression passe au nord du lieu d'observation, tandis qu'il reste insensible à ceux dont le centre de dépression passe au sud.

Ce fait concorde avec ce qu'on sait de la production des phénomènes électriques dans le cyclone; on les remarque surtout dans le demi-cercle méridional, tandis qu'ils se manifestent peu souvent dans le demi-cercle du nord.

CHAPITRE II

NOTIONS D'HYDROLOGIE

L'hydrologie, ou science des eaux, s'occupe des eaux météoriques dans leur voyage des nuages à la mer. Elle comprend donc l'étude de la pluie et celle de l'évaporation; ces deux parties de l'hydrologie ont fait l'objet de développements particuliers au chapitre précédent. Il nous reste à étudier les eaux terrestres qui se distinguent en eaux superficielles et eaux souterraines; la pluie qui tombe sur le sol se divise en trois parts : l'une s'évapore et retourne à l'atmosphère, la seconde pénètre dans la profondeur du sol et alimente les nappes souterraines, la troisième ruisselle à la surface et se rend aux vallées d'où elle gagne la mer.

M. Belgrand a donné aux eaux qui coulent à la surface du sol pour gagner les rivières et les fleuves le nom d'eaux torrentielles; elles caractérisent les pays imperméables; ce sont elles qui déterminent les inondations redoutables dont certaines régions sont affligées; nous en dirons ici quelques mots, mais l'étude complète en sera mieux placée en tête du traité des rivières et de la navigation. Nous nous occuperons plus spécialement de l'hydrologie souterraine, c'est-à-dire des eaux qui se meuvent à l'intérieur de la terre et qui, lorsqu'elles émergent à la surface, constituent les sources.

Les sources et les nappes souterraines ont fait, en même temps que les puits ordinaires et les puits artésiens, l'objet d'un chapitre de notre *Traité des distributions d'eau*; certaines notions se trouveront nécessairement répétées ici.

Origine des sources. — Lorsqu'une eau souterraine vient à paraître au jour et à couler sur le sol, elle constitue une source.

Les sources sont le produit de l'infiltration des eaux pluviales.

Il a fallu bien des siècles pour arriver à établir cette notion si simple. Les anciens, voyant que le niveau de la mer se maintenait invariable, malgré l'apport incessant des fleuves, s'imaginaient que les eaux revenaient de la mer aux sources par des conduits souterrains, et qu'il s'établissait ainsi une circulation continue.

La circulation continue existe bien, mais elle s'établit par l'atmosphère et les nuages et non par les profondeurs du sol.

On connaissait, dit Darcy, l'une des moitiés de cette chaîne sans fin qui devait nécessairement unir les fontaines à la mer et la mer aux fontaines. On dérobait l'autre à nos yeux en la plaçant dans les entrailles de la terre; on peut la voir au contraire, les nuages en sont les anneaux.

La position, la puissance et la nature des sources dépendent uniquement de la constitution géologique des terrains qui leur donnent naissance.

1° **Sources des terrains imperméables.** — Lorsque, par un temps pluvieux, on parcourt un pays à sol imperméable, on voit l'eau ruisseler de toutes parts; s'il y a de la pente, cette eau coule à la surface et forme de nombreux ruisseaux qui ravinent les terres et qui, réunissant leurs eaux, engendrent des rivières limoneuses d'allure torrentielle. S'écoulant à l'air libre, les eaux pluviales arrivent rapidement et simultanément dans les vallées ; il en résulte des crues violentes qui se produisent en quelques heures, mais qui disparaissent de même lorsque la pluie vient à cesser; pendant la sècheresse, l'alimentation de ces cours d'eau cesse complètement et ils ne tardent pas à tarir.

Lorsque le sol imperméable est peu accidenté, les eaux pluviales ne trouvent pas d'écoulement; elles s'accumulent à la surface sous forme de marais et d'étangs. Ces eaux stagnantes constituent un danger permanent pour la contrée qu'elles recouvrent; il faut, en bien des cas, leur créer un écoulement vers les vallées et les terrains perméables.

L'alimentation des cours d'eau situés dans les terrains imperméables est donc essentiellement superficielle : les sources importantes sont rares dans ces terrains, et cela se conçoit, car une source est toujours alimentée par de l'eau pluviale qui s'est infiltrée dans le sol.

Cependant, l'imperméabilité d'un terrain n'est jamais absolue; il y a toujours des crevasses, des fissures qui recueillent une certaine quantité d'eau ; les assises calcaires ou sableuses que l'on trouve associées à beaucoup de terrains imperméables ont toujours une certaine perméabilité, quelque compactes qu'elles soient, et lorsqu'elles affleurent sur le flanc d'un coteau ou lorsqu'elles se relèvent pour se montrer au jour elles donnent lieu à des pleurs ou suintements qui se réunissent pour former des sources.

La présence des sources dans les terrains imperméables tient donc à des causes accidentelles ; ces sources peuvent être nombreuses, mais il est bien rare qu'elles soient puissantes ; en tous cas, elles sont irrégulièrement distribuées : on les trouve aussi bien dans le voisinage des sommets que sur le flanc d'un coteau ou dans une ondulation quelconque.

2° *Sources des terrains perméables.* — Considérons maintenant un terrain perméable : il absorbe toutes les eaux pluviales qu'il reçoit ; celles-ci ne s'écoulent pas à la surface, elles pénètrent dans le sol jusqu'à ce qu'elles se trouvent arrêtées par une assise imperméable. Les ruisseaux sont rares à la surface du pays puisqu'il n'y a pas d'écoulement superficiel : l'eau s'accumule à l'intérieur sous forme de nappe à niveau variable, qui monte ou qui s'abaisse, suivant que la saison est plus ou moins pluvieuse.

Qu'une ondulation, qu'une vallée se présente, dont le fond soit au-dessous du niveau de la nappe souterraine, celle-ci s'épanche et prend son cours à l'air libre. Elle forme une rivière dont les eaux sont limpides, car elles ont été filtrées pendant leur voyage souterrain ; la vitesse du courant n'est jamais bien grande, parce que les pluies passent lentement de la surface du sol au fond de la vallée et que leur vitesse de circulation dans la terre est nécessairement restreinte.

Avec ces cours d'eau, on ne connaît point les crues rapides et violentes ; mais quand la nappe d'eau s'est élevée, elle met beaucoup de temps à descendre et il en résulte des crues modérées, mais durables.

Dans les terrains perméables, les eaux s'infiltrent par toute la surface du sol pour alimenter la nappe souterraine ; celle-ci, drainée par les vallées, s'y épanche lorsque le fond de ces vallées est au-dessous du niveau de la nappe.

La communication entre la nappe souterraine et la rivière s'établit en divers points où l'eau trouve un débouché plus facile ; ces points sont autant de sources.

Les sources dans les terrains perméables se rencontrent donc exclusivement au fond des vallées, c'est-à-dire sur le cours d'eau lui-même ou dans son voisinage ; les plateaux et les versants conservent une aridité perpétuelle.

Si le terrain est également perméable, comme le sable, et présente à peu près partout la même facilité au passage des eaux, les sources existent tout le long du lit et des berges de la rivière ; elles sont nombreuses et faibles.

Généralement, il n'en est pas ainsi ; il se présente toujours des portions de sol moins résistantes où le passage est plus facile ; c'est là qu'on trouve les sources les plus abondantes, auxquelles correspond souvent l'origine d'un cours d'eau.

Ainsi, la condition nécessaire et suffisante pour qu'il existe des sources et, par suite, un cours d'eau dans une vallée perméable, c'est que le niveau de la nappe d'eau souterraine soit plus élevé que le fond de la vallée.

Dans les parties hautes des vallées et dans beaucoup de vallées secondaires, il n'en est pas ainsi : la nappe d'eau n'affleure pas le fond ; on a ce qu'on appelle des vallées sèches.

La nappe d'eau, étant alimentée par les infiltrations des eaux pluviales, s'élève ou s'abaisse suivant que la saison est plus ou moins humide ; le débit des sources est lui-même soumis à ces variations. A la suite d'une sécheresse prolongée, des vallées que parcourait un cours d'eau peuvent se transformer en vallées sèches pour un temps plus ou moins long ; les sources des parties hautes d'une vallée peuvent se tarir et la naissance de la rivière descend de plus en plus à mesure que la sécheresse se prolonge.

Les sources puissantes se rencontrent fréquemment aux points où les vallées secondaires viennent se souder à la vallée principale.

Lorsqu'on descend de la ligne de faîte qui sépare les bassins de la Loire et de la Seine par la vallée de l'Essonne jusqu'à la Seine, on se trouve d'abord sur le terrain qui porte le nom d'argile du Gâtinais ; c'est un sol imperméable, sillonné de ruisseaux et autrefois parsemé d'étangs ou gâtines ; en hiver, l'eau se montre de toutes parts ; en été tous les cours d'eau sont à sec ; on rencontre bien çà et là des sources, elles sont disséminées au hasard : il en existe dans la forêt d'Orléans, au voisinage de la ligne de faîte, mais ces sources ont toutes un débit très-faible ; elles ont pour origine quelques veines de sable plus ou moins pur placées sous l'argile et faisant office de drains naturels ; après les argiles du Gâtinais, on entre sur un sol éminemment perméable, calcaire de Beauce et sables de Fontainebleau ; tous les plateaux sont arides, bien des vallées secondaires sont sèches ; les sources se rencontrent uniquement sur le thalweg de la vallée principale, et les plus importantes, qui portent le nom de noues ou de gouffres, apparaissent à la jonction de cette vallée et d'un vallon secondaire. Ces sources donnent quelquefois passage au produit de l'infiltration des eaux pluviales tombées sur une vaste étendue ; aussi sont-elles puissantes et souvent capables de faire tourner un moulin à quelques mètres de leur naissance.

Niveaux d'eau. — Dans un pays à sol imperméable, les sources, avons-nous dit, n'obéissent à aucune loi ; elles sont dues à une cause accidentelle et on peut en rencontrer partout, dans le voisinage des sommets comme dans les ondulations des terrains.

Dans un sol perméable, les sources se rencontrent exclusivement dans le thalweg des vallées, c'est-à-dire au voisinage des cours d'eau ; si le sol est d'une perméabilité homogène, comme le sable, les sources sont continues ; si la perméabilité n'est pas homogène, comme dans les calcaires, les sources se trouvent aux points de plus facile passage et prennent quelquefois une importance capitale.

Lorsqu'un sol perméable est superposé à une couche imperméable, toute l'eau d'infiltration qui le pénètre est arrêtée par cette dernière ; elle s'écoule dans le sens de la pente et paraît au jour sous forme de sources que l'on rencontre tout le long de la ligne de séparation des deux terrains perméable et mperméable.

Qu'une vallée d'érosion se présente dans un pareil terrain, on trouvera à flanc de coteau la ligne de séparation de l'assise perméable et de l'assise imperméable, et tout le long de cette ligne on trouvera des sources plus ou moins importantes, suivant que le passage est plus ou moins facile. La ligne séparative est ce qu'on appelle un niveau d'eau. Ainsi, dans la vallée de la Marne, il existe un niveau d'eau qui correspond à la ligne séparative de l'argile plastique et du calcaire grossier.

Puits artésiens. — Les couches perméables et imperméables se superposent dans un bassin comme le font des coupes de dimensions décroissantes que l'on empile les unes dans les autres ; l'eau pluviale s'infiltre dans les couches perméables et descend dans la terre jusqu'à ce que la coupe soit pleine. Les couches imperméables restent sèches et l'eau se trouve emprisonnée entre deux de ces couches consécutives. Si l'on se place au centre du bassin et qu'on vienne à forer un tube à travers toutes les couches, l'eau emprisonnée s'élève et tend à prendre son niveau hydrostatique ; ce niveau peut être dans certains cas plus élevé que la surface du sol, la diminution de pression se traduit par une production de vitesse, l'eau jaillit à la surface et l'on est en présence d'un jet naturel, de ce qu'on appelle un puits artésien.

Recherche des sources. Sources artificielles. — Dans notre étude sur les distributions d'eau, à laquelle le lecteur voudra bien se reporter, nous avons présenté l'histoire des chercheurs de sources anciens et modernes ; nous avons montré que la géologie était le seul guide dans la recherche des sources et que tout dépendait de la nature des terrains et du mode de superposition des assises perméables et imperméables ; nous avons indiqué comment on pouvait imiter la nature et créer des sources artificielles en recouvrant de terre meuble une surface imperméable et nous avons donné des exemples de ce genre de travail. Nous ne reviendrons pas sur ces divers points.

Distinction entre les sources à réservoirs arénacés et les sources à réservoirs caverneux. — Les véritables terrains perméables sont les terrains arénacés, composés de fragments plus ou moins gros laissant entre eux des vides où se logent les eaux d'infiltration. Ces terrains donnent lieu à des nappes souterraines continues et ressemblent à de vastes éponges uniformément humectées ; leur capacité d'absorption dépend du rapport qu'ils présentent entre le vide et le plein ; si le vide occupe le quart de la capacité, une hauteur de 1 mètre de pluie se transformera dans le sol en une nappe d'eau de 4 mètres de hauteur.

Ce qu'il faut remarquer, c'est la continuité de la nappe ; lorsqu'elle s'épanche dans une vallée ou à flanc de coteau, elle le fait en général par une infinité de suintements et de petites sources.

Ce phénomène n'existe pas dans les autres terrains perméables, comme les calcaires ; généralement, ils présentent une perméabilité très-irrégulière ; il faut considérer que les eaux s'y accumulent surtout dans des fissures, qui se sont transformées peu à peu en réservoirs caverneux dont la capacité augmente sans cesse par la puissance dissolvante des eaux.

Ces réservoirs caverneux sont souvent constitués par les failles ou cavités souterraines produites par les dislocations géologiques. Lors des soulèvements de montagnes, l'écorce terrestre est déchirée suivant certaines lignes : ces déchirures sont des failles ; lorsqu'elles restent apparentes, elles forment des vallées, mais souvent elles ont été recouvertes par des dépôts plus récents et constituent alors dans les profondeurs de la terre une série de réservoirs reliés par des étranglements et par des déversoirs dont le seuil est plus ou moins élevé.

Les eaux souterraines doivent produire à l'intérieur du sol des érosions et des dépôts comme elles le font dans les vallées. Ainsi, certaines eaux chargées de calcaire dissous à la faveur d'un excès d'acide carbonique abandonnent ce calcaire en filtrant à travers des assises sableuses qui se trouvent transformées en assises de grès à ciment calcaire.

Les eaux de source sont généralement claires et limpides; elles n'agissent donc pas par entraînement mécanique. Cependant, il en est qui à certaines époques sont chargées de terre, ce qui prouve que les eaux sont susceptibles de prendre une vitesse notable dans leurs conduits souterrains.

Mais les eaux souterraines n'exercent guère leur travail d'érosion que par dissolution.

Les matières minérales ne sont en général solubles qu'à très-faible dose et on ne s'explique pas au premier abord que des sources, même assez puissantes, puissent déterminer dans le sol la formation de cavernes importantes. Cependant, si l'on réfléchit que l'action dissolvante est sans cesse renouvelée et s'exerce pendant des siècles, on reconnaît que de la sorte de grands volumes peuvent être entraînés avec le temps.

Supposez une source dont les eaux entraînent en dissolution $\frac{1}{365}$ de leur volume de matières minérales ; en une année, elle aura déterminé dans le sol une excavation d'un volume égal à celui de son débit journalier; si le débit est seulement de 10 litres à la seconde, cela fait 864 mètres cubes en 24 heures et par conséquent une excavation souterraine de 864 mètres cubes par an.

Lorsque les eaux pénètrent dans des failles profondes, elles s'échauffent à mesure qu'elles descendent; sous l'influence de la température et de la pression, elles se chargent de matières salines; l'eau chaude plus légère tend à remonter pour faire place à l'eau froide affluente et elle s'épanche sur le sol lorsqu'elle arrive à se créer un chemin et à trouver un déversoir à un niveau inférieur au niveau d'infiltration. Il s'établit ainsi un courant continu qui alimente les sources thermales.

Mais c'est dans les terrains calcaires que l'on rencontre les plus puissantes des sources à alimentation caverneuse. La source du Groseau, à la base du mont Ventoux, et la fontaine de Vaucluse en sont les exemples les plus connus.

Le mont Ventoux, qui se dresse dans le département de Vaucluse, s'élève à la l'altitude de 1960 mètres; sa base est une ellipse dont le grand axe, dirigé de l'est à l'ouest, a 25 kilomètres de long et le petit axe dirigé du nord au sud, a 7500 mètres, ce qui donne une superficie de 15000 hectares. Le Ventoux est un massif calcaire éminemment perméable (terrain néocomien); sa surface

n'est point ravinée et il absorbe une grande partie de l'eau qu'il reçoit. A sa base, on ne trouve qu'une source importante, la source du Groseau, à l'ouest, qu'indique le niveau de l'assise imperméable supportant le massif calcaire : cette assise est donc inclinée de l'est à l'ouest et creusée en forme de vallée, puisque les eaux ne s'écoulent que par un seul orifice. Il tombe environ $0^m,85$ de hauteur de pluie sur le mont Ventoux, ce qui correspond à un débit de 4 mètres à la seconde pour la surface entière. Le débit des sources est à peu près de 2 mètres cubes, c'est-à-dire qu'il représente la moitié de la pluie tombée.

De même, la fontaine de Vaucluse n'est que l'exutoire d'un vaste bassin de calcaire néocomien de 70 kilomètres de longueur, qui s'étend jusqu'à Sisteron, sur une superficie de 96 500 hectares, c'est un plateau élevé sur lequel il tombe $0^m,80$ environ de pluie par an, ce qui représente pour la superficie totale un débit de 24 mètres cubes à la seconde.

La fontaine de Vaucluse donne un débit de 10 à 12 mètres cubes à la seconde c'est-à-dire environ la moitié du cube de l'eau de pluie que recueille le bassin.

Un débit aussi considérable, quelque faible que soit la puissance dissolvante des eaux, ne peut manquer de déterminer dans les profondeurs du sol la formation de cavernes considérables, dont l'existence se manifestera un jour par des éboulements.

Les cavernes, que l'on connaît et dans lesquelles on pénètre, sont du reste très-nombreuses dans les formations calcaires et elles sont dues évidemment à la cause que nous venons de dire.

M. l'ingénieur Duponchel en cite un exemple intéressant: c'est la source du Lez, dans le département de l'Hérault.

Elle donne 800 à 1 000 litres à l'étiage, et jaillit au pied d'un rocher dans un goufre de 15 à 20 mètres de profondeur. Le déversoir de ce goufre fut un jour abaissé, de manière à faire descendre le plan d'eau de $1^m,20$, puis on rétablit le déversoir à son niveau primitif. Les eaux mirent huit heures à remonter et à regagner la différence de $1^m,20$; la superficie du gouffre n'étant que de 1000 mètres, « il est nécessaire d'admettre que pendant tout ce temps les eaux ont dû s'accumuler dans de vastes bassins intérieurs, à niveau horizontal, dont la surface peut aisément se déduire du volume des eaux qui l'ont rempli. En comptant sur un débit de 800 litres, et ce jour-là le produit de la source était certainement plus considérable, il n'a pas dû s'emmagasiner en sept heures moins de 20000 mètres cubes d'eau sur une hauteur de $0^m,80$, ce qui exige une superficie totale de 25 000 mètres carrés pour l'ensemble du groupe des cavernes intérieures et des conduites grandes ou petites existant à la hauteur du niveau de l'écoulement habituel des eaux. Ce chiffre suffit pour faire comprendre quelle étendue doivent avoir les étages supérieurs de ces cavités, dont le réseau s'étend dans le massif des montagnes et plateaux calcaires occupant le centre et le nord de l'arrondissement de Montpellier. Des feuilles de châtaigner, arbre qui croît au plus près dans les Cévennes, à plus de 50 kilomètres de distance, remarquées plusieurs fois dans les eaux de la source du Lez, indiquent en effet que son rayon d'alimentation doit au moins se prolonger jusque là. »

HYDROLOGIE DU BASSIN DE LA SEINE.

M. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées, que nous avons déjà tant de fois cité, a publié en 1872 ses *Études hydrologiques sur le bassin de la Seine*. C'est un ouvrage du plus haut intérêt, qu'il faut lire entièrement, et dont nous ne pouvons donner ici que les éléments principaux.

A l'époque où le bassin de la Seine était hanté par l'ours des cavernes, le mammouth et le renne, le relief était le même qu'aujourd'hui; mais les fleuves occupaient dans les vallées des largeurs beaucoup plus grandes. La Seine, à Paris, n'avait pas moins de deux kilomètres; et c'est dans les graviers de ces grands cours d'eau que l'on retrouve les outils en silex taillés et non polis dont se servait l'homme primitif.

Alors, tous les cours d'eau étaient plus ou moins violents et torrentiels suivant le degré de perméabilité des terrains et tous roulaient des eaux limoneuses, de sorte que la tourbe ne pouvait se produire.

La tourbe n'a pris naissance qu'en même temps que nos petits cours d'eau; dans les vallées à pentes rapides parcourues par des eaux limoneuses, le remplissage du lit des cours d'eau de l'âge de pierre s'est fait avec des graviers; dans les vallées à faible pente parcourues par des eaux limpides le rétrécissement du lit s'est au contraire opéré par la tourbe.

La tourbe, produit de la carbonisation des végétaux ligneux, ne se développe pas dans des eaux troubles et limoneuses; on ne peut donc la rencontrer dans les vallées des terrains imperméables et on ne la trouve que dans les vallées des terrains perméables, vallées dont les rivières sont alimentées, non par les eaux superficielles, mais par les eaux souterraines clarifiées par la filtration naturelle.

Après avoir établi ces notions préliminaires, M. Belgrand étudie l'orographie du bassin de la Seine, dont il décrit les diverses régions.

Le chapitre II traite de la pluie et de la manière dont elle se répartit dans le bassin tout entier; ces notions nous sont connues et nous n'avons pas à les reprendre.

Le chapitre III montre la relation qui existe entre les hauteurs de pluie et les crues des cours d'eau. Il vérifie la loi formulée depuis longtemps par M. Dausse : les pluies des mois chauds ne profitent pour ainsi dire point aux cours d'eau; les crues importantes sont presque toujours produites par les pluies de la fin de l'automne, de l'hiver ou du commencement du printemps.

Ce qui produit surtout la sécheresse dans le bassin de la Seine, ce n'est pas la rareté ou l'abondance de la pluie, c'est surtout la répartition des pluies; une année moyennement pluvieuse pourra être marquée par des crues désastreuses, si toute l'eau tombe pendant la saison froide; une année, au contraire, à laquelle correspond une grande hauteur de pluie, pourra bien ne compter aucune crue sérieuse si la plus grande partie de l'eau tombe pendant l'été.

Le chapitre IV traite du mode de l'écoulement des eaux pluviales à la surface du sol; à la page 116, nous avons signalé la différence qui existe sous ce rapport entre les terrains imperméables et les terrains perméables; dans les premiers, l'eau ruisselle de toutes parts à la surface du sol et se rend aux vallées principales par une multitude de ravines et de ruisseaux; dans les seconds, l'eau

pénètre à l'intérieur du sol et s'épanche dans les vallées après un voyage souterrain plus au moins long. Dans les terrains arénacés, à perméabilité régulière et continue, les eaux sourdent par une multitude de petites sources; dans les terrains calcaires, les sources semblent correspondre à des fissures, à des réservoirs caverneux, elles sont moins nombreuses et par suite plus puissantes.

Le seul aspect d'une carte bien faite suffit à reconnaître le degré de perméabilité du sol : les cours d'eau sont-ils nombreux, on est en présence d'un terrain imperméable, tel est le granite du Morvan, telle encore l'argile du Gâtinais; les cours d'eau sont-ils rares et très-espacés, on se trouve sur un terrain perméable, tel est le calcaire de Beauce et le sable de Fontainebleau. Les plateaux imperméables sont recouverts de marais et d'étangs; les plateaux perméables sont toujours secs.

Les crues des cours d'eau des terrains imperméables sont violentes et courtes; celles des cours d'eau des terrains perméables sont tranquilles et longues et la vitesse dans la variation des niveaux permet d'apprécier le degré d'imperméabilité du sol.

Aux terrains imperméables, il faut des ponts d'un vaste débouché, capables de donner un passage facile aux eaux torrentielles; dans les terrains perméables un faible débouché suffit et bien des vallées secondaires restent toujours sèches, même après les plus grandes pluies.

Dans les chapitres qui suivent, M. Belgrand fait la classification des eaux du bassin de la Seine, il décrit les nappes souterraines et les sources, en s'attachant surtout à celles qui peuvent être utilisées pour l'alimentation de Paris; enfin, il s'occupe des crues et de leurs lois, c'est un sujet que nous trouverons dans le *Traité de navigation.*

Les terrains perméables et imperméables se différencient non-seulement par le nombre, et par l'allure des cours d'eau qui les sillonnent; ils offrent encore des différences remarquables sous le rapport des cultures qu'ils sont aptes à recevoir.

Les terrains imperméables, lorsqu'ils ne sont pas recouverts par le limon des plateaux, sont généralement stériles, à moins qu'on ne vienne leur apporter la chaux qui leur manque; les terrains perméables, qui ne sont pas recouverts par le limon des plateaux sont stériles aussi, cependant, ils sont susceptibles souvent de porter des bois et des vignes, c'est-à-dire des végétaux qui se nourrissent surtout dans l'atmosphère et n'empruntent au sol que fort peu de principes minéraux.

Les prairies naturelles, celles qui donnent le foin proprement dit et qu'on ne renouvelle pas par l'assolement, peuvent être cultivées sur toute l'étendue des terrains imperméables, aussi bien sur les plateaux et les montagnes que sur les rives des cours d'eau.

Dans les terrains perméables, les prairies naturelles, qui doivent être continuellement humectées, ne se rencontrent que sur les rives des cours d'eau; encore sont-elles généralement tourbeuses et marécageuses et ne donnent-elles que des produits de faible valeur.

Sur les plateaux imperméables, la prairie se transformerait en marécage et ne saurait prospérer; vient-on à drainer ces plateaux, ils prennent les qualités des terrains perméables et ne peuvent plus recevoir des prairies naturelles.

Il faut bien distinguer les prairies naturelles des prairies artificielles, telles que la luzerne et le trèfle, qui, elles, alternent avec d'autres cultures.

L'ouvrage de M. Belgrand se termine par des considérations générales de la plus haute importance, que nous regrettons de ne pouvoir examiner.

HYDROLOGIE DU JURA.

La publication de l'hydrologie du bassin de la Seine a montré tout l'intérêt qui s'attache à des publications de ce genre. A l'exemple de M. Belgrand, M. l'ingénieur en chef Lamairesse a publié en 1874, avec le concours du ministère des travaux publics, ses *Études hydrologiques sur les monts Jura;* elles sont aussi fort intéressantes, et il sera utile d'en reproduire ici une annalyse sommaire.

« Le relief du département du Jura, dit M. Lamairesse, est déterminé par la chaîne calcaire des monts Jura qui le limitent à l'est sur toute sa longueur et par l'émergence plutonique de la Serre qui, à son extrémité nord-ouest, forme dans le département un îlot, miniature et prolongement de l'îlot que les Vosges forment dans l'ensemble des terrains jurassiques. »

Nous distinguerons dans le Jura six parties principales qui sont :

1° La Serre, entre l'Ognon et l'Arve, affluents du Doubs.

2° Le vignoble, formé par les assises marneuses et marno-compactes du Keuper et du Lias; il s'étend depuis la Serre dans le Doubs jusqu'au delà de Bourg, dans le département de l'Ain, tout le long des falaises qui forment la limite occidentale des monts Jura et le bord de la mer tertiaire de la Bresse.

3° Le premier plateau de 13 kilomètres de largeur moyenne, formé par le terrain jurassique inférieur, oolithe compacte ; il s'élève au-dessus du vignoble par une falaise presque verticale de plus de 100 mètres de haut et présente dans le sens de la Saône, c'est-à-dire du nord au sud, une légère pente. « Il constitue par sa nature perméable et par ses vides intérieurs un réservoir d'une énorme épaisseur qui alimente les cours d'eau du vignoble et de la Bresse. »

4° Le second plateau, à l'est du précédent dont il est séparé par les chaînes de montagnes qui se suivent entre Andelot-en-Montagne et Lons-le-Saulnier; le soulèvement de ces chaînes parallèles à la direction générale du Jura a déterminé des failles et des sillons où coulent les rivières de l'Ain et de l'Angillon; le second plateau s'étend jusqu'à la limite inférieure des sapins, vers l'atitude de 900 mètres.

5° Le troisième plateau commence à cette altitude et comprend les sommets les plus élevés du Jura.

6° La Bresse, produite en partie par le relèvement du plateau de la Dombe.

Sur les trois plateaux existent beaucoup de bassins fermés, qui absorbent les eaux pluviales et servent de réservoirs aux sources qui naissent au pied des plateaux.

Cette configuration du Jura que nous venons de décrire est facile à suivre sur une bonne carte de France.

Nous allons, avec M. Lamairesse, examiner au point de vue hydrologique chacune des six régions qui composent le massif français du Jura.

1° *La Serre.* — La forêt de la Serre, d'une superficie de 4,000 hectares, recouvre les terrains plutoniques et permiens, c'est-à-dire imperméables.

L'eau glisse à la surface de ces terrains lorsqu'ils sont dénudés, et pendant

l'été, les ravins sont à sec. La présence de la forêt conserve à une faible profondeur dans le sol une certaine humidité et engendre quelques pleurs et suintements auxquels on ne saurait donner le nom de sources.

Les failles de ce terrain imperméable recueillent la plus grande quantité de l'eau superficielle, et c'est à la base du massif de la Serre que les eaux d'infiltration sont rendues sous forme de sources par les marnes du Lias.

Il se produit quelquefois dans les vallons des crues extraordinaires qui causent de grands dommages.

2° *Le Vignoble.* —Le Vignoble est formé de marnes très-hydroscopiques, c'est-à-dire absorbant et retenant beaucoup d'eau. L'évaporation doit donc être un maximum dans le Vignoble comme dans la Bresse, où les eaux, ne trouvant pas d'écoulement souterrain, séjournent à la surface; d'après M. Lamairesse, l'évaporation moyenne annuelle ne peut pas être inférieure à $0^m,18$ dans un pays constamment humide.

La formation marneuse du Vignoble donne une masse d'eau considérable; ainsi les vignes, plantées dans le sens de la plus grande pente, se trouvent dans un sol gras de $1^m,50$ de profondeur; on creuse dans ce sol des fossés dont le fond est garni d'une cuvette en pierres plates que l'on recouvre de terre; la moitié de ces fossés donne de l'eau en toute saison.

Le Vignoble possède beaucoup de sources pérennes, alimentées par les eaux d'infiltration des parties supérieures, ou même par les eaux qu'ont absorbées les fissures du premier plateau. Il y a aussi beaucoup de sources temporaires qui viennent avec les pluies. Dans la saison humide, on voit, à un niveau plus élevé que celui des sources pérennes, se produire des écoulements éphémères, sortes de soupiraux suppléant à l'insuffisance du débouché ordinaire.

Il existe aussi quelques sources-déversoirs qui vident par siphonnement des cavités intérieures; l'écoulement n'y commence que quelques jours après les pluies, lorsque la sécheresse règne déjà; aussi ces sources portent-elles souvent le nom d'affameuses.

Les habitants appellent calamiteuses des sources qui coulent sans cause apparente, parce qu'elles sont alimentées par des bancs qui remontent jusqu'au dessus du premier plateau, à plus de 10 kilomètres de leur point d'affleurement.

3° *Le premier plateau.* — Le premier plateau est remarquable par ses bassins fermés. Au nord on trouve, comme premier compartiment, celui dn Lison jurassien; ce compartiment possède un réservoir appelé *la Mare*, de 5 ares de superficie, qui n'est jamais à sec et dont on n'a pu atteindre le fond; ce réservoir est la source du Lison qui, 1800 mètres à l'aval, fait tourner un moulin et se perd ensuite dans un entonnoir; il a un cours d'eau souterrain passant sous les laizines et ne reparaît au jour que lorsqu'il rencontre le terrain oxfordien.

Le Lison du Doubs s'échappe d'une belle grotte taillée dans le roc vif; à certaines époques ses eaux sont boueuses; c'est que la source est alimentée par les larges fissures des terrains supérieurs, tels que les entonnoirs et les laizines. Les laizines sont des fentes de 1 mètre de large et de 3 à 4 mètres de profondeur, qui se forment à chaque instant sur le premier plateau; elles sont fort dangereuses, et, dès qu'il s'en forme dans une commune, les habitants sont convoqués pour les combler.

Les compartiments suivants sont le bassin fermé de la Furieuse, le bassin fermé partiel de la Cuisance, qui s'égoutte souterrainement dans cette rivière.

Le thalweg de ce compartiment est marqué par une file de huit entonnoirs en forme de cône renversé.

Nous citerons à la suite des bassins précédents : 1° le bassin fermé de l'Orain, dont le point le plus bas est à 85 mètres au-dessous du niveau moyen du pourtour, et qui renferme de nombreuses sources et beaucoup d'entonnoirs ; 2° le bassin fermé de la Brenne, peu étendu, dont le point le plus bas est à 57 mètres du niveau moyen du pourtour ; il possède une source qui sort horizontalement d'une fissure profonde à la base d'un rocher de 14 mètres de hauteur ; 3° les bassins fermés de la Seille, de la Vallière et de ses affluents, etc.

En procédant à des jaugeages nombreux sur les cours d'eau du premier plateau, M. Lamairesse est arrivé aux conclusions suivantes :

« Ce qui frappe le plus, c'est l'énorme retard que la présence des bois dans les bassins fermés supérieurs apporte au grossissement des sources inférieures qu'ils alimentent par filtration. On remarque que les compartiments boisés ne renferment pas d'entonnoirs, qu'ils ne transmettent aux sources inférieures les eaux de pluie que lorsque celles-ci sont doubles au moins et très-souvent plus que quadruples de celles qui filtrent à travers les compartiments non boisés, et seulement après un temps double ou quadruple. Cela s'explique par la différence des obstacles que l'un et l'autre espace de terrain présentent à la filtration.

« Les parties non boisées du grand bassin sont cultivées dans les thalwegs et en pâturages sur les versants : elles sont fissurées de toutes parts, et rien n'empêche les eaux de pénétrer dans les fentes de toute grandeur.

« Dans les bois, au contraire, les fentes, où se trouvait originairement entre les strates déjà quelque terre rougeâtre ou argile sur laquelle les arbres ont commencé à croître, ont été peu à peu remplies, d'abord par les racines des arbres et des plantes, puis par les détritus végétaux et enfin par les terres et débris amenés par les eaux. Le sol a acquis peu à peu une sorte d'imperméabilité relativement à la puissance d'absorption du reste du plateau. Les laizines et entonnoirs de tout âge se sont peu à peu fermés et comblés. Aujourd'hui, ce n'est qu'après des pluies très-intenses ou prolongées que les eaux peuvent arriver au sous-sol fissuré en traversant la cuirasse d'un sol beaucoup moins pénétrable ; les pluies ordinaires restent, partie sur les voûtes feuillues où elles se vaporisent, partie sous ces voûtes où la végétation absorbe tout ce qui n'est pas absorbé par la faible évaporation intérieure de la forêt.

« D'après cela, il est manifeste que les bois, s'ils ne diminuent pas le débit d'étiage, retardent certainement les crues des sources alimentées par des bassins fermés ou par des plateaux qui fonctionnent comme ces derniers, c'est-à-dire dont les pentes sont trop faibles pour que les eaux pluviales puissent glisser à leur surface et parvenir aux ruisseaux autrement qu'à travers le sous-sol perméable. L'effet inverse doit avoir lieu sur des versants perméables assez raides pour que les eaux pluviales s'y écoulent malgré les obstacles que leur présentent les végétaux de toute grandeur.

« Ainsi que M. Belgrand l'a constaté, les terrains non boisés de la Champagne, dans la formation éminemment perméable de la craie, ne donnent presque point d'eau aux rivières du pays ; mais les sources que l'on a obtenues par le boisement ou perdues par des déboisements dans ce pays, prouvent que les forêts y produisaient des ruisseaux. Nous avons maintes fois observé, dans la Champagne et dans l'argile imperméable de la Bresse, l'effet inverse de la présence des arbres dans les deux formations. Tous les cultivateurs de la Champagne savent

qu'un noyer au milieu d'un champ frappe presque de stérilité l'espace qui l'entoure dans un certain rayon ; en Bresse, au contraire, le même espace tranche sur le terrain environnant par une végétation beaucoup plus vigoureuse. Cela tient à ce que les racines de l'arbre, en divisant le sol compacte, font descendre par une sorte de drainage les eaux jusqu'au sous-sol ; on tire de là cette conséquence que, contrairement à ce que M. Belgrand a trouvé dans les terrains granitiques, les bois doivent, dans les terrains compactes de nature argileuse, alimenter l'étiage et diminuer les crues. Les crues des petits cours d'eau de la Bresse et du Jura sont plus ou moins fortes et arrivent à l'artère principale avant ou après la crue de cette artère, suivant qu'ils sont alimentés par des terrains en culture ou en prairies, ou bien par des versants boisés et des étangs. »

4° *Le second plateau.* — Au pied du second plateau, on trouve une série de larges vallées marneuses, l'Ain, l'Angillon, la Valouse, occupant sur toute la longueur, du nord au sud, une bande de terrain oxfordien qui se rétrécit à son extrémité et qui pénètre normalement dans le plateau à l'est par des golfes étroits et profonds; dans ces golfes coulent les affluents des rivières précitées et les lacs qui les alimentent. Ces golfes sont bordés par des falaises abruptes qu'a produites la déchirure du sol soulevé par les masses intérieures, et ils se terminent par des cirques élevés couronnés de forêts.

Ce plateau est formé d'un calcaire compacte peu absorbant; il offre moins de fissures que le plateau précédent; mais ces fissures sont beaucoup plus importantes. Dans les failles parallèles à la direction générale des chaînes et des vals, il existe des réservoirs et des conduits souterrains qui se déversent dans les vallées perpendiculaires ; ces lignes de failles ou réservoirs souterrains sont jalonnées à la surface par des entonnoirs et des effondrements anciens et modernes.

La source de l'Ain se trouve dans un de ces réservoirs, qui se prolonge par des puits, des bassins et des couloirs, si bien qu'on peut marcher plus d'une heure sans atteindre le fond. En sécheresse, il n'y a qu'un filet d'eau ; mais, pendant les orages, l'eau arrive subitement en chassant avec bruit devant elle une grande masse d'air.

Dans le vallon de la Brême, le flanc de la montagne porte une crevasse verticale de 27 mètres de haut, de laquelle s'élance un ruisseau capable de faire tourner des moulins ; si l'on pénètre dans la crevasse, on entend au loin le bruit des cascades intérieures.

Les lacs, réservoirs superficiels, occupant le fond des vallées le plus souvent néocomiennes ou oxfordiennes, sont le phénomène inverse des grottes et réservoirs souterrains. Beaucoup de ces lacs ont une décharge souterraine, et le cours d'eau qu'ils alimentent reparaît au jour à quelques kilomètres plus loin ; la vitesse de transmission dans le conduit souterrain du lac de Harlay, conduit de 10 kilomètres de longueur, est de $0^{m},23$ à la seconde.

Le lac de Silans s'épanche, lors des grandes eaux, dans le bassin du Rhône, par-dessus la ligne de partage du bassin de l'Ain; en temps ordinaire, il alimente par ses filtrations un cours d'eau considérable qui prend naissance au pied de sa digue et va se perdre dans le lac de Nantua, réservoir régulateur de toutes les eaux de la contrée.

5° *Le troisième plateau.* — Il renferme toute la série jurassique avec le terrain néocomien et des dépôts glaciaires. C'est une réunion de bassins fermés et de longues et étroites vallées, ou combes, parallèles à la direction générale du Jura avec des versants et des thalwegs rapides ; la transmission des eaux plu-

viales, qui devrait être très-rapide, se trouve arrêtée par les lacs, les bassins fermés et un grand nombre de forêts.

Dans cette région, on trouve le lac de Grandvaux, d'une superficie de 100 hectares avec 30 mètres de profondeur, alimenté surtout par des sources de fond, et plusieurs autres lacs dont nous ne ferons pas l'énumération. Des tourbières, nombreuses et étendues, concourent à la régularisation du régime des eaux ; elles absorbent de grandes quantités d'eau, modèrent les crues et entretiennent l'étiage.

6° *La Bresse.* — « La Bresse est formée par le relèvement du plateau de la Dombe, qui est incliné du midi au nord en sens inverse de la Saône et la domine à Lyon de 130 mètres, et par l'exaltation de la chaîne du Jura dont elle dépend comme une immense vallée dont cette chaîne formerait le versant oriental. »

La Dombe est un plateau bombé : dans les parties supérieures de ses vallées, la pente est faible, on trouve des prairies et de nombreux étangs ; dans la partie moyenne, la pente est rapide, et l'écoulement torrentiel des eaux se fait dans des lits ravinés ; dans la partie basse, la pente diminue, les cours d'eau diminuent de vitesse mais restent encore fort étroits. Une série de ramifications de la partie supérieure se réunissent en général avant d'entrer sur la partie moyenne à forte pente, et au point de réunion on trouve toujours un étang très-étendu et très-profond. Ces étangs ne suffisent pas à régulariser les crues torrentielles.

Dans la Bresse de l'Ain, la région supérieure comprend plutôt des prairies marécageuses que des étangs ; la partie moyenne est moins torrentielle que dans la Dombe et couverte aussi de prairies marécageuses.

Dans la Bresse du Jura, l'écoulement des versants s'étant trouvé arrêté par les bourrelets latéraux des cours d'eau, il s'est formé des marécages ; les plus connus sont les marais de Villevieux ; pour assainir les terrains, on construit des boit-tout, puits verticaux formés d'une enceinte de pieux foncés jusqu'aux assises perméables ; cette enceinte est remplie de blocs de pierre et l'on constitue de la sorte un véritable drainage vertical.

A la Bresse se rattache le groupe des terrains de la forêt de Chaux, de 21,000 hectares de superficie ; les assainissements opérés dans cette forêt font que les eaux se rendent plus rapidement aux rivières et déterminent des crues exceptionnelles qu'il serait facile d'atténuer au moyen de réservoirs régulateurs.

LES TORRENTS ET LE DÉBOISEMENT.

Nous avons étudié au chapitre précédent l'influence des forêts sur la répartition des pluies, nous avons montré que sur ce sujet il n'existait point d'expériences concluantes : les forêts les plus importantes, situées au fond de l'océan aérien, ne paraissent pas devoir exercer plus d'influence sur les grands courants de l'atmosphère que n'en exercent sur les eaux quelques bancs de sable au fond d'un grand fleuve.

Nous admettrons donc, en l'état actuel de la science, que les forêts ne sauraient exercer une action prépondérante sur la répartition des pluies.

Il n'en est pas de même si l'on examine l'écoulement des eaux pluviales à la surface du sol : les torrents, qui ravagent quelques-unes de nos régions montagneuses, sont dus au déboisement et au défrichement des versants, et les meil-

leures armes pour les combattre et les détruire sont le reboisement et le gazonnement des montagnes.

Description sommaire des torrents des Hautes-Alpes. — M. l'ingénieur Cézanne a repris et complété dans ces derniers temps la remarquable *Étude sur les torrents des Hautes-Alpes*, que M. l'ingénieur Surell avait publiée vers 1840 et que l'Académie des Sciences avait couronnée. C'est d'après ces deux savants auteurs que nous examinerons ici la question des torrents et du reboisement des montagnes, question dont on saisit la haute importance après un séjour de quelques semaines dans nos Alpes françaises, si intéressantes et si peu explorées jusqu'à présent.

Les torrents des Alpes sont des cours d'eau de troisième ordre, qui n'ont que quelques kilomètres de longueur, qui coulent dans les dépressions ou entre les contre-forts d'un versant, avec une pente presque partout supérieure à $0^{m},06$ par mètre et toujours supérieure à $0^{m},02$; ils affouillent dans la montagne, entraînent les terres, les graviers et les blocs, qu'ils déposent ensuite dans les vallées, où ils divaguent par suite de ces dépôts.

Le torrent des Alpes comprend, en général, trois parties caractéristiques représentées par la fig. 23. Dans la montagne se trouve le bassin de réception qui s'étale en éventail et se subdivise en plusieurs ravins ; c'est le bassin de réception qui recueille les eaux pluviales et leur fournit les matières qu'elles entraînent. Cet entonnoir aboutit à un goulot resserré où rien ne se dépose, et où les eaux, prenant leur maximum de vitesse, arrachent quelquefois aux berges des blocs énormes de rochers ; le goulot est prolongé par un canal d'écoulement généralement de faible longueur, sur le parcours duquel le torrent est inoffensif. Enfin, le goulot et le canal d'écoulement se terminent par le lit de déjection, entassement de cailloux et de blocs dispersés sur une étendue considérable de terrain : cet entassement a la forme d'un demi-cône, dont le sommet se trouve



Fig. 23.

à l'extrémité du canal d'écoulement et qui s'avance dans la vallée comme un contre-fort de la montagne, ou encore comme un vaste éventail déployé et courbé en dos d'âne; c'est l'inverse du bassin de réception qui, lui, ressemble à un éventail déployé et courbé de manière à former un creux. Le lit de déjection occupe quelquefois une largeur de trois kilomètres avec une hauteur de 70 mètres.

Cette forme générale des torrents se retrouve, avec des proportions moindres, dans tous les pays ou des versants rapides et dénudés sont attaqués par les eaux.

Le torrent coule au sommet du lit de déjection et se trouve suspendu comme une menace permanente sur les vallées qui le bordent.

Lorsqu'on relève le profil en long d'un cours d'eau de ce genre, on trouve une courbe continue, concave vers le ciel, dont le rayon de courbure diminue à mesure qu'on s'élève dans la montagne; c'est-à-dire que la pente diminue à mesure qu'on descend vers la vallée; c'est précisément la forme de lit qui convient le mieux à un courant dont le volume croît en raison de la distance parcourue.

Ainsi dans le bassin de réception le lit du torrent est dans un creux par rapport au sol environnant; dans le lit de déjection, au contraire, il est en relief.

Les terres et les blocs enlevés dans la montagne se déposent au sortir de la gorge parce que les eaux rencontrent des pentes plus faibles où leur vitesse s'atténue, et aussi parce qu'elles peuvent s'épancher librement sur de vastes espaces. Les eaux coulent dans une concavité dirigée suivant l'arête du cône de déjection qui fait suite à la gorge d'écoulement; mais un pareil lit suspendu est fort instable et ses berges sont essentiellement mobiles, de sorte que le courant peut, en quelques instants, se porter sur d'autres points et ravager un sol qui se croyait à l'abri de ses atteintes.

Dans le bassin de réception, les orages versent, en quelques heures, une énorme quantité d'eau; les courants, déchaînés sur des pentes rapides, rongent leurs berges, dévorent peu à peu les propriétés voisines et même jusqu'à des villages entiers.

Les alluvions des torrents se composent de boue, de graviers, de galets et de blocs. La boue est formée, dans les Alpes, par la trituration du calcaire noir feuilleté; cette boue vaseuse devient compacte en se desséchant et fait périr les récoltes qu'elle couvre; ce n'est qu'après une longue culture qu'elle devient fertile. Les graviers se déposent sur les pentes inférieures à $2^{cm},5$ par mètre, les galets de $0^{m},25$ de côté sur les pentes de $0^{m},025$ à $0^{m},05$, et les blocs, dont le volume atteint jusqu'à un demi-mètre cube, sur les pentes de $0^{m},05$ à $0^{m},08$.

Les crues des torrents, et par suite leurs ravages, se produisent lors de la fonte des neiges, au mois de juin, et à la suite des orages de la fin de l'été. Les crues des pluies d'orage sont les plus dangereuses; ces pluies tombent comme des trombes soudaines; la nappe d'eau comprime l'air du bassin de réception et un vent violent s'échappe de la gorge comme de la buse d'un soufflet gigantesque.

Il faut remarquer que les effets d'érosion, produits par les masses d'eau torrentielles des montagnes, sont rendus plus sensibles dans les Alpes par la nature même du sol sur lequel elles coulent. Les terrains primitifs, granites et gneiss, n'apparaissent que sur les sommets; au-dessous on trouve les terrains tertiaires, le groupe crétacé et le groupe oolithique; le calcaire ardoisé, à texture feuilletée, est particulièrement facile à attaquer par les eaux.

Les torrents les plus dangereux des Alpes sont de formation relativement récente, et beaucoup même ne sont pas arrivés encore à se créer un profil continu et stable, de sorte que leurs ravages ne s'arrêteront que lorsque les roches solides auront été mises au jour, à moins qu'on n'arrive à atténuer les effets d'érosion, chose possible comme nous le verrons tout à l'heure.

Influence des forêts sur les cours d'eau. — Nous avons eu l'occasion déjà de signaler l'influence qu'exercent les forêts sur les cours d'eau. Nous résumerons ici les diverses formes de cette influence :

1° Quelle que soit la nature géologique d'un bassin, au moment où l'évaporation atteint son maximum, les cours d'eau atteignent un minimum. Ce résultat se vérifie à Paris pour la Seine ; il se vérifie aussi pour le Pô bien que celui-ci soit alimenté par les glaciers des Alpes, ainsi que pour le Rhin, pourvu qu'on se place à une distance suffisante des montagnes.

Ainsi, plus l'évaporation est active, plus le débit des eaux diminue ; toute cause ayant pour effet de modérer l'évaporation relèvera par cela même l'étiage des cours d'eau.

Or, il est généralement admis que les bois conservent la fraîcheur, et que l'évaporation à l'ombre des forêts est beaucoup moindre que sur les plaines voisines ; l'expérience de tous les jours fait la preuve de ce fait.

On objecte que les forêts arrêtent l'eau pluviale qui séjourne sur les feuilles et retourne en vapeur dans l'atmosphère ; des expériences montreraient même que les feuilles retiennent en hiver 30 0/0 et en été 50 0/0 de la pluie, et que les espèces touffues peuvent arrêter jusqu'à 80 0/0 de la pluie. M. Cézanne fait remarquer qu'il y a lieu de discuter ces expériences et d'examiner la position des pluviomètres : Un pluviomètre placé au centre d'un parapluie ne recevrait pas d'eau, celui qui serait sous l'égout en recevrait beaucoup plus que s'il était placé au milieu d'un champ découvert. Un phénomène analogue doit se produire avec les arbres des forêts. Aussi les expériences de M. Mathieu ont-elles donné sous bois une hauteur de pluie, dont le rapport à la hauteur de la pluie en plaine a été de 90 à 95 0/0 ; en revanche, l'évaporation a été cinq fois plus grande hors bois que sous bois.

Donc, il paraît à peu près certain que les forêts conservent beaucoup plus d'humidité et évaporent moins que le sol découvert. Elles exercent donc une action bienfaisante sur le débit des cours d'eau en le régularisant pendant l'été et en l'augmentant pendant cette saison.

2° En ce qui touche l'infiltration, l'influence des forêts est aussi sensible. Nous avons vu que les sources étaient alimentées par les eaux pluviales qui s'infiltrent dans les terrains perméables, et que l'infiltration était d'autant plus considérable que l'évaporation était moindre.

Sur un terrain perméable découvert, l'évaporation absorbe en été toute l'eau pluviale, les sources ne sont plus alimentées, leur débit s'abaisse à moins qu'elles ne correspondent à de très-vastes réservoirs souterrains ; toute cause diminuant l'évaporation augmente l'infiltration et c'est par là que les forêts agissent. Sous cet aspect, elles concourent encore à régulariser le débit des cours d'eau pendant l'été.

Elles peuvent encore le régulariser par un autre effet, ainsi que l'a montré M. Lamairesse dans ses *Études hydrologiques sur les monts Jura* ; le plateau calcaire fendillé du Jura absorbe immédiatement toute l'eau qu'il reçoit, si sa surface est découverte ; mais, lorsque cette surface est boisée, le feutrage des racines retient l'eau à la surface, détermine un écoulement superficiel et ralentit

la transmission de la pluie entre le terrain qui la reçoit et les sources. De là une nouvelle cause de régularisation du débit. Ainsi, la forêt agit de deux manières en diminuant l'évaporation et en ralentissant la transmission de l'eau qui alimente les cours d'eau soit superficiellement, soit souterrainement.

Bien que certaines rivières dont les bassins sont boisés sur une notable étendue possèdent un cours irrégulier, il ne faut pas en conclure que les forêts ne tendent pas à régulariser l'allure des cours d'eau, car il faudrait voir d'abord ce que cette allure deviendrait si on déboisait les bassins.

D'après l'avis de beaucoup d'ingénieurs, les forêts conservent et régularisent les sources.

Suivant M. Vallès, inspecteur général des ponts et chaussées, il faut distinguer l'effet des forêts suivant la nature des sources.

Les forêts, d'après lui, seraient nuisibles aux sources profondes et favorables aux sources superficielles; le feutrage dont les forêts tapissent le sol retient l'eau à la superficie et l'empêche de pénétrer dans les profondeurs de la terre; sans doute, le sol reste humide, mais c'est une humidité stagnante qui ne profite pas aux sources.

« En résumé, conclut M. Cézanne, dans la plupart des cas et sauf des circonstances spéciales, l'action des forêts sur l'évaporation et sur l'infiltration est de nature à augmenter le produit de la pluie, c'est-à-dire la part de la nappe pluviale qui profite aux cours d'eau. Ce double effet tend surtout à se produire en été, c'est-à-dire dans la saison où l'eau courante est le plus précieuse. »

A l'appui de cette conclusion, il faut citer l'expérience entreprise en Australie sur de vastes proportions, et rapportée par M. de Beauvoir dans son *Voyage autour du Monde;* l'Australie, avec ses plateaux dénudés, manque de sources et de ruisseaux. On est arrivé à en créer en effectuant de nombreuses plantations.

3° Les forêts exercent surtout leur action bienfaisante sur le ruissellement superficiel des eaux pluviales.

Lorsque l'on considère des plateaux ou des versants à faible pente sur lesquels le ravinement est impossible, l'action régularisatrice des forêts est discutable et l'influence n'en est point nettement établie.

Mais elle est hors de doute lorsqu'il s'agit de versants inclinés d'un ravinement facile. M. Cézanne le fait comprendre par une comparaison bien simple : lorsque l'on regarde sur un carreau vertical les gouttes de pluie qui y tombent, on les voit séparément, chacune d'elles descend lentement et il est facile de la suivre ; au contraire, lorsque l'on considère les eaux recueillies par un toit et qu'on les fait couler dans une gouttière, même peu inclinée, on les voit prendre une grande vitesse et on a peine à les suivre de l'œil. Le phénomène est donc tout différent suivant qu'une certaine quantité d'eau est fractionnée en gouttelettes ou réunie en une seule masse. Dans le premier cas, l'adhérence et le frottement des gouttes d'eau sur le corps solide qui les porte est vaincue avec peine ; dans le second cas, l'adhérence et le frottement s'exercent surtout sur les molécules qui touchent les parois du canal, les autres ne sont plus soumises qu'à l'action retardatrice des molécules liquides qui les environnent, et, comme nous le savons, cette action est très-faible.

Or, qu'arrive-t-il sur un sol nu facilement attaquable ? Les gouttelettes de pluie se rejoignent en filets qui se creusent un petit ravin ; les filets se réunissent pour former des ruisseaux, et bientôt toute la masse pluviale est réunie

en un seul courant qui prend une grande vitesse, qui ravage tout sur son passage et par cela même augmente sans cesse le mal.

Qu'arrive-t-il, au contraire, sur un sol boisé? Les gouttelettes restent divisées; elles sont arrêtées par le feutrage superficiel et ont le temps de l'humecter complétement, de sorte qu'une partie de la pluie se trouve retenue et emmagasinée tandis que l'autre ne s'écoule qu'avec lenteur.

Extinction des torrents par le reboisement. — Pour éteindre les torrents, il n'y a donc qu'à reboiser les montagnes.

L'expérience l'a prouvé : des torrents autrefois terribles, dont les ravages ont laissé des traces ineffaçables, sont devenus inoffensifs depuis que les bois recouvrent leur bassin de réception. Quelques-uns de ces torrents se sont rallumés avec violence lorsque les populations imprudentes ont de nouveau détruit les forêts protectrices.

Les causes qui provoquent et entretiennent la violence des torrents, dit M. Surell, sont : d'une part, la friabilité du sol, de l'autre, la concentration subite d'une grande masse d'eau. Or, les forêts rendent le sol moins affouillable ; elles absorbent et retiennent une partie des eaux pluviales et empêchent la concentration instantanée de la partie qu'elles n'absorbent pas ; par conséquent, elles détruisent l'une et l'autre cause.

A défaut de forêts, le gazon suffit à arrêter les eaux dans leur course et à empêcher la formation des torrents ; il divise les eaux et donne au sol la liaison et la ténacité qui lui manque. Mais, pendant l'été, les montagnes gazonnées sont envahies par des milliers de moutons qui piétinent le sol et détruisent la végétation en rongeant l'herbe jusqu'aux racines. L'abus des pâturages, la concentration de grandes quantités de bestiaux sur de trop faibles espaces font disparaître le manteau de gazon qui protége les montagnes ; ce manteau déchiré s'en va par lambeaux, et quand le ravinement a commencé il est bien difficile de l'arrêter.

Pour empêcher la ruine du département des Hautes-Alpes, il n'y avait donc qu'à favoriser le reboisement et le gazonnement des montagnes. C'est à quoi ont pourvu les lois du 28 juillet 1860 et du 8 juin 1864, dont l'application a donné de remarquables résultats.

ÉTUDE D'UNE RIVIÈRE ASSÈCHÉE.

La rivière de l'Œuf prend naissance dans la forêt d'Orléans, près de la ligne de faîte qui sépare le bassin de la Loire du bassin de la Seine. Son cours général est dirigé du sud-ouest au nord-est. Entre la forêt d'Orléans et Pithiviers, chef-lieu d'arrondissement du Loiret, elle reçoit deux affluents principaux : le ruisseau de la Varenne à droite et la Laye de Montigny à gauche. A l'aval de Pithiviers, elle reçoit le produit de plusieurs noues ou vallées secondaires et ne tarde pas à rencontrer la Rimarde, à laquelle elle s'unit pour constituer l'Essonne, affluent de la Seine.

Depuis plusieurs années, le débit de l'Œuf va sans cesse en diminuant ; pendant l'été de 1874, on pouvait parcourir à pied sec le lit de cette rivière depuis sa naissance jusqu'à Pithiviers ; à l'aval de cette ville, l'eau commençait à se

montrer, mais les dernières usines seules en avaient assez pour fonctionner quelques heures par jour.

Malgré les pluies de l'hiver 1875, le lit de l'Œuf est resté à sec à l'amont de Pithiviers.

Et cependant, cette rivière offrait naguère un état relativement prospère ; les squelettes de plusieurs usines sont là pour l'attester ; leurs déversoirs et leurs

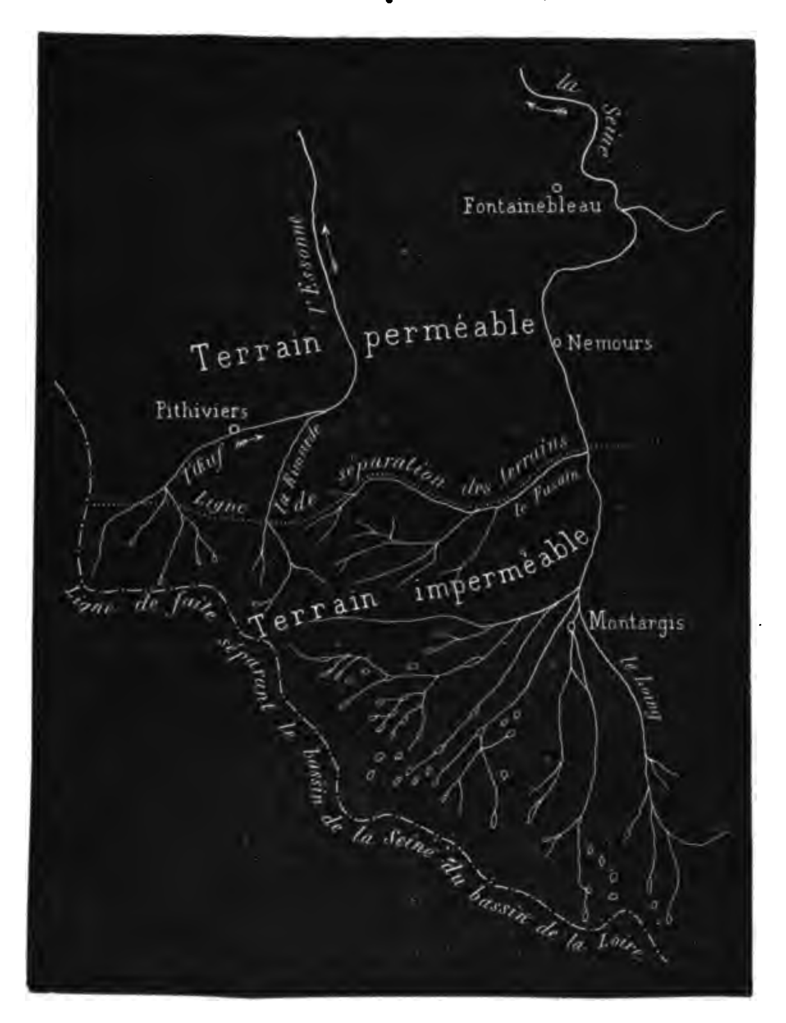


Fig. 24.

vannages subsistent, mais l'eau a disparu ; leurs roues sont suspendues au-dessus d'un lit qui n'est plus qu'un chemin creux.

Le bassin de la rivière de l'Œuf appartient à deux formations géologiques, ainsi que le montre l'extrait de carte reproduit ci-dessus d'après la carte hydrologique du bassin de la Seine de M. Belgrand : la partie supérieure de ce bassin appartient aux argiles du Gâtinais et la partie inférieure au calcaire lacustre de Beauce.

L'aspect seul de la carte permet de reconnaître, au premier coup d'œil, la nature des deux formations.

Le plateau ondulé qui s'étend de Nemours à Chartres est formé par les sables de Fontainebleau et le calcaire de Beauce, terrain éminemment perméable, aussi n'est-il arrosé que par huit rivières ; la principale est l'Essonne, dont l'Œuf est l'affluent. Au contraire, le Gâtinais est, comme le montre la carte, sillonné d'une multitude de cours d'eau qu'il est inutile d'énumérer ; ce pays tire son nom des gâtines ou mares dont il était autrefois recouvert et qui ont en partie disparu par suite des drainages et des travaux effectués pour l'écoulement des eaux superficielles.

La séparation entre les argiles du Gâtinais et le calcaire de Beauce est indiquée par une ligne qui passe entre la forêt d'Orléans et Pithiviers, c'est-à-dire entre cette ville et l'origine de la rivière de l'Œuf.

Ce cours d'eau a donc deux modes d'alimentation ; dans la partie haute, terrain imperméable, il est uniquement alimenté par l'écoulement superficiel ; dans la partie inférieure, terrain éminemment perméable, il ne faut compter que sur le produit des sources. Nous ne reviendrons pas sur ces notions précédemment expliquées.

L'origine de la rivière qui nous occupe se trouve non pas dans des sources, la nature du sol s'oppose à leur existence, mais dans une série d'étangs qui reçoivent l'égout du versant nord-est de la forêt d'Orléans ; ces étangs sont munis de bondes de vidange qu'on ne lève que pendant l'hiver et qui emmagasinent pour l'été une certaine quantité d'eau. La suppression de ces réservoirs n'améliorerait pas le régime du cours inférieur de la rivière et n'aurait pour effet que de priver d'eau pendant l'été les parties hautes du bassin.

A mi-chemin environ entre la forêt d'Orléans et Pithiviers, le lit ou plutôt le fossé qui sert de lit à la rivière passe du terrain sablo-argileux au calcaire de Beauce. Pendant l'hiver, quand les eaux atteignent ce point de séparation, elles sont absorbées comme si elles passaient dans un crible ; pendant l'hiver de 1875, la rivière présentait un assez fort débit tant qu'elle restait sur le terrain imperméable, mais, dès qu'elle atteignait le calcaire, elle s'évanouissait et, après quelques centaines de mètres de parcours, il ne restait pas une goutte d'eau. Il faut une humidité prolongée pour que les eaux, coulant en abondance dans la partie supérieure du bassin, arrivent jusqu'à Pithiviers.

Après trois ou quatre kilomètres de parcours sur le calcaire de Beauce, la vallée s'accuse davantage et la tourbe apparaît : elle repose sur le tuf calcaire et son épaisseur atteint jusqu'à huit mètres. La présence de la tourbe indique bien la nature du cours d'eau : il est à très-faible pente et n'est alimenté que par les eaux souterraines ; il n'y arrive pour ainsi dire pas d'eaux superficielles, car la tourbe ne se développe pas dans les eaux troubles. En effet, les plateaux de la Beauce ne conservent jamais d'eaux superficielles ; on ne voit nulle part une flaque d'eau dans les champs, qui s'assainissent en quelques heures à la suite des plus grandes pluies. Les vallées secondaires elles-mêmes ne portent trace d'aucun ruisseau, mais, à leur point de rencontre avec la vallée principale, on trouve en général une source assez importante. Les autres sources sont réparties le long du thalweg de la vallée principale ; elles sont nombreuses à cause de la nature éminemment perméable du sol.

A l'amont de Pithiviers, les sources, jadis pérennes, ont disparu ; on les retrouve à leur ancien emplacement, mais au moins à un mètre au-dessous de

leur orifice primitif. Il y a donc eu abaissement progressif de la nappe d'eau qui les alimente.

Ces sources n'existaient, bien entendu, que sur la formation calcaire : dans la partie supérieure du bassin, notamment dans la forêt d'Orléans, on trouve des sources nombreuses, mais elles sont insignifiantes et dispersées ; on les rencontre aussi bien dans le voisinage des faîtes que dans les dépressions ; vu la nature générale du sol, elles tiennent en effet à des causes locales et accidentelles ; il existe çà et là des veines de sable plus ou moins pur qui drainent la surface argileuse et qui abandonnent le produit de ce drainage lorsqu'on les coupe ou lorsqu'elles apparaissent au jour.

Ce n'est pas sur ces faibles suintements qu'il faut compter pour l'alimentation d'une rivière ; ils sont incapables de produire le moindre ruisseau.

Si la rivière de l'Œuf est asséchée, cela tient uniquement à l'abaissement du niveau de la nappe souterraine qu'alimentaient les sources; cette nappe se déverse maintenant à une altitude moindre qu'autrefois, et le niveau des sources pérennes s'est abaissé en même temps qu'elle.

Il était intéressant de savoir si, jadis, l'état de la rivière a toujours été florissante, et s'il n'a pas, au contraire, présenté des fluctuations analogues à celles qui se sont manifestées depuis une vingtaine d'années.

Les recherches opérées dans les archives nous ont donné peu de renseignements :

En 1634, un sieur Lamberville sollicite du roi Louis XIII la permission d'ouvrir un canal pour la transnavigation de Loire en Seine, en empruntant le cours de l'Essonne et et passant par la rivière de Plouvier, aujourd'hui Pithiviers. Ce projet fut repris en 1790 et le mémoire à l'appui disait : « Il est généralement reconnu que la forêt d'Orléans est très-aquatique, que l'eau en sourcille de toutes parts, qu'il y a au plus un pied de terre sur la superficie et qu'au-dessous est un fond de glaise; la glaise qui se trouve en seconde couche empêche l'imbibition de l'eau et la force à s'épancher partout où il se trouve de la pente. Les endroits où la forêt est plate forment des étangs et, dans les temps humides, les moindres vallées forment des rivières ; ces rivières à la vérité, ajoute le mémoire, ne coulent plus pendant six mois de l'année dans les grandes sécheresses et trois mois dans les années ordinaires. » L'alimentation du canal dont il s'agit eût été certainement impossible ou tout au moins fort difficile, et il eût fallu établir une cuvette maçonnée au passage sur le calcaire de Beauce.

De 1800 à 1826, période sèche, les eaux de la rivière de l'Œuf allèrent sans cesse en diminuant et cet état de choses souleva les réclamations des habitants, des conseils municipaux et du conseil d'arrondissement. Entre autres raisons, les pétitionnaires exposaient que, pour des raisons trop longues à déduire, la source mère de la rivière a totalement disparu et ne présente plus qu'un bas-fond aride et sans apparence d'eau, que les autres sources qui fournissaient antérieurement, au dire des habitants, une grande quantité d'eau, ne produisent maintenant que des filets d'eau insignifiants.

L'état de la rivière était donc à peu près le même qu'à présent; mais, à partir de 1830, les plaintes s'éteignirent, les eaux revinrent dans la rivière. C'est qu'en effet on était entré depuis 1826 dans une période humide, dont les effets ne tardèrent pas à se faire sentir.

Cette période humide continua jusqu'en 1856 et, pendant ce laps de temps, 1833 à 1856, le régime de la rivière ne suscita pas de plaintes sérieuses.

L'année 1856 marqua le commencement de la période sèche dans laquelle

nous nous trouvons aujourd'hui. C'est aussi avec cette année 1856 que les plaintes recommençèrent à se faire entendre.

Existe-t-il un moyen de remédier au mal et de rendre à la rivière de l'Œuf son ancienne abondance? La seule réponse à cette question est la négative.

La pénurie d'eau tient surtout à une cause naturelle et générale et non pas à une cause locale que l'on puisse combattre; cette cause générale, c'est la sècheresse qui règne depuis 1857 dans le bassin de la Seine, sécheresse telle, qu'il ne s'en était point produit de pareille depuis cent cinquante ans.

La période actuelle, qui a commencé en 1857, est remarquable par la rareté relativé des neiges et des pluies pendant les mois froids; les cours d'eau n'ont donc [reçu qu'une alimentation insuffisante, puisque les pluies d'été ne leur profitent pas et ils ont vu leur niveau s'abaisser sans cesse.

Si nous remontons jusqu'au commencement du dix-huitiéme siécle, nous voyons qu'en 1719 les eaux de la Seine sont descendues à un niveau exceptionnellement bas et c'est à ce niveau qu'on a fixé le zéro de l'échelle du pont de la Tournelle.

De 1732 à 1799, période d'humidité, la Seine descend une année sur 9 au-dessous du zéro.
1800 à 1826, période de sécheresse, — 3 —
1827 à 1856, période humide, — 10 —

Depuis 1857, période de sécheresse sans exemple, tous les ans la Seine descend au-dessous du zéro et y reste presque cent jours par an.

Cependant, ces années n'ont pas été les moins pluvieuses du siècle et la hauteur d'eau annuelle n'est pas inférieure à la moyenne.

Il faut donc attribuer la sécheresse non pas à une diminution dans la quantité d'eau qui tombe chaque année, mais à la mauvaise répartition des pluies.

Lorsque la période sèche prendra fin, la nappe d'eau souterraine du calcaire de Beauce se relèvera peu à peu et l'on peut espérer voir renaître les sources supérieures actuellement taries.

A l'appui de l'assèchement de la rivière qui nous occupe, on a invoqué d'autres raisons : dés déboisements et des assainissements dans les forêts. Il n'y a pas eu de déboisements sérieux depuis le commencement du siècle et, si l'on consulte les cartes, on reconnaît qu'ils ne s'étendent pas sur plus de 100 hectares; il est vrai que la forêt a été assainie et percée de fossés qui livrent aux eaux pluviales un écoulement plus rapide. Mais, il n'a jamais fallu compter sur les eaux superficielles pour l'alimentation continue de la rivière de l'Œuf, parce que celles-ci sont absorbées dés qu'elles arrivent sur le terrain perméable, à moins que celui-ci ne soit lui-même saturé d'humidité.

Ce qui est plus sérieux, c'est l'influence de la culture sur l'évaporation; avec la culture perfectionnée, ainsi que nous l'ont montré les expériences de M. Marié-Davy, l'évaporation augmente beaucoup; par suite, les eaux d'infiltration diminuent et les sources sont affamées. Dans l'espèce, cette raison, quelque sérieuse qu'elle soit, ne nous paraît pas applicable; depuis vingt ans, la culture du pays n'a pas sensiblement changé de forme et de procédés et des modifications légères ne peuvent suffire à assécher complétement une rivière.

La disparition des eaux coïncide avec la période sèche que nous traversons; il est probable qu'elle prendra fin en même temps qu'elle.

CHAPITRE III

NOTIONS DE CHIMIE AGRICOLE

La culture rationnelle, c'est-à-dire celle qui se propose de tirer du sol le plus grand produit annuel en lui conservant une force productive constante ou, ce qui revient au même, en lui conservant toujours la même constitution physique et chimique, la culture rationnelle repose sur un petit nombre de principes, qui ont été mis en lumière dans ces dernières années. Quelques points restés obscurs ne tarderont pas à s'éclaircir, grâce aux efforts qui surgissent de toutes parts.

Le problème de la culture rationnelle se compose de deux éléments :

La connaissance de la constitution physique et chimique des terres, d'une part ;

La connaissance de la constitution chimique des végétaux et des conditions physiques qui conviennent à leur développement, d'autre part.

De la juste combinaison de ces deux éléments résulte la solution du problème de la culture rationnelle.

Ce simple exposé indique les trois grandes divisions de l'étude que nous nous proposons d'aborder ici d'une manière sommaire :

1° Caractères physiques et chimiques des terres,
2° Composition et développement des végétaux,
3° Culture rationnelle.

1° CARACTÈRES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES TERRES.

Composition des terres. — Nous avons étudié en géologie la constitution de l'écorce solide du globe, nous avons donné la composition chimique et l'âge relatif des assises qui se sont succédé depuis l'époque où la terre a commencé à se refroidir jusqu'à nos jours. Mais les roches solides ne sont que le squelette de la terre ; la chair qui recouvre ce squelette se compose de toutes les terres arables. C'est elle qui se laisse pénétrer par les racines des végétaux et leur permet de se développer, ce qu'ils ne pourraient faire sur des roches compactes.

Les terres arables sont le produit de la pulvérisation des roches compactes ;

cette pulvérisation est due aux agents atmosphériques, la pluie, la gelée et surtout à l'action perpétuelle de toutes les eaux courantes.

Les alluvions fertiles des grandes vallées proviennent de l'émiettement des montagnes par les eaux torrentielles qui exercent sur la surface de la terre une action incessante de nivellement.

Les terres meubles, les seules qui intéressent la culture, ont donc une composition chimique en relation directe avec celle des roches qui leur ont donné naissance.

Les terres provenant de la trituration des granites et des roches primitives à base de feldspath sont donc dénuées de calcaire ; celles qui proviennent des roches calcaires pures manquent de sels alcalins.

Rappelons sommairement la composition chimique des éléments qui composent les principales roches de l'écorce terrestre.

Ces éléments sont :

1° Le carbonate de chaux, le calcaire, qui se rencontre à l'état pur et cristallisé et qui porte alors le nom de spath d'Islande, d'arragonite, de chaux carbonatée fibreuse, de marbre saccharoïde ; viennent ensuite la chaux carbonatée compacte qui, mêlée à des couches argileuses, constitue le massif du Jura, le calcaire oolitique formé par la réunion d'une masse de petits grains de calcaire compacte, la chaux carbonatée terreuse, presque toujours impure, qui se rencontre dans les terrains crétacés et tertiaires ;

2° La dolomie, ou carbonate de magnésie, isomorphe du carbonate de chaux ;

3° Le sulfate de chaux, qui existe à l'état cristallisé, mais qui, à l'état compacte, et plus ou moins pur, constitue la pierre à plâtre ;

4° Le quartz, ou silice pure. Le quartz cristallisé est le cristal de roche, l'améthyste, le caillou d'Alençon, etc. L'agate est du quartz qui se rencontre en rognons dans les terrains anciens ; il en est de même du silex noir, gris ou jaune. D'autres variétés du quartz sont le quartz terreux, le quartz résinite et le jaspe, silex mélangé d'oxyde de fer. Le quartz commun se trouve dans le grès sous forme de grains de sable réunis par un ciment tantôt siliceux, tantôt calcaire ;

5° Le feldspath, qui comprend une famille de minéraux de structure analogue ; ce sont des silicates doubles d'alumine et d'une base alcaline ou terreuse ; cette base est la potasse, la soude ou la chaux ; il y a toujours un alcali en même temps que la chaux ;

6° Le mica, qui se présente en lamelles plus ou moins épaisses dont le clivage est parallèle à la base ; c'est un silicate double dont les bases sont l'alumine, la magnésie, la potasse et la lithine avec une proportion moindre de protoxydes de fer et de manganèse ;

7° Le talc, qui est un silicate hydraté de magnésie ;

8° L'amphibole ; la variété blanche est un silicate double de chaux et de magnésie ; dans la variété verte, la magnésie est remplacée par un mélange de magnésie et de protoxyde de fer ; la dose de fer est plus considérable encore dans la variété noire ;

9° Le pyroxène, qui est un silicate double de chaux et de magnésie, dans lequel la chaux peut se trouver remplacée par le protoxyde de fer et la magnésie par les protoxydes de fer et de manganèse.

De la combinaison de ces éléments résultent les roches les plus connues qui sont :

1° Le granite et ses variétés. Le granite est un mélange de quartz, de mica et

de feldspath. Parmi les variétés du granite, nous citerons : la protogine, où le mica est remplacé par le talc ou la chlorite (la protogine constitue le massif du mont Blanc et les montagnes du Creuzot) ; la syénite, où la plus grande partie du mica est remplacée par l'amphibole ; le gneiss et les schistes, sorte de granite dans laquelle le mica domine (le gneiss est toujours superposé au granite et lui sert de croûte). Du gneiss on passe par transitions successives aux argiles schisteuses ou schistes ardoisiers qui donnent des ressources précieuses pour la couverture des édifices ;

2° Le porphyre. C'est une pâte généralement feldspathique dans laquelle sont disséminés des cristaux de feldspath ou de quartz ;

3° Les trachytes, roches éruptives, présentant comme composition une grande analogie avec le porphyre à pâte feldspathique ; les cristaux enchâssés sont du feldspath, de l'amphibole ou du mica ;

4° Le basalte, roche composée de feldspath labrador et de pyroxène ;

5° Les laves, déjections des volcans, roches voisines tantôt des trachytes, tantôt des basaltes ;

6° Les calcaires et dolomies, roches compactes plus ou moins pures, déjà décrites ;

7° Les roches arénacées, formées de fragments enlevés par les eaux aux formations anciennes et reliés ensuite par une pâte ou ciment ; si les fragments sont anguleux, la roche s'appelle brèche ; s'ils sont gros et arrondis, elle s'appelle poudingue ; s'ils sont petits, elle s'appelle grès. Nous avons reconnu en géologie les puissantes assises du grès houiller, du grès rouge, du grès bigarré, du grès vert et du grès de Fontainebleau, lequel résulte de grains siliceux réunis par un ciment siliceux ou calcaire ; le sable est du grès dénué de ciment ;

8° Les argiles et les marnes. L'argile pure, dont le type est l'argile plastique, est un silicate d'alumine ; c'est une vase solidifiée. Généralement l'argile renferme du carbonate de chaux, et lorsque la proportion de ce dernier atteint 25 p. 100, on est en présence de ce qu'on appelle les marnes. Les argiles sont fréquemment colorées en rouge par de l'hydrate d'oxyde de fer.

Cette énumération nous montre que le nombre des éléments minéraux solides entrant dans la composition des terres arables est peu considérable. Ces éléments sont : les alcalis, la chaux, l'alumine, la silice, la magnésie, les oxydes de fer et de manganèse. Ce sont les oxydes de fer qui donnent à la terre sa coloration plus ou moins rougeâtre.

Dans toutes les terres arables on trouve en outre l'eau et les gaz de l'atmosphère, ainsi que l'humus ou terreau, résidu de la décomposition des matières végétales.

L'humus est de la matière végétale en fermentation ; il représente la chaleur solaire condensée, et, par la fermentation, il rend à la terre cette chaleur ou, ce qui est la même chose, la force vive emmagasinée précédemment par les végétaux. Sous l'influence de l'humidité, le terreau absorbe avidement l'oxygène de l'air et dégage de l'acide carbonique ; cet acide, à l'état naissant, est absorbé par les végétaux et semble concourir à leur accroissement en même temps que l'acide carbonique de l'air. L'humus est soluble dans la potasse caustique, et, si l'on verse un acide dans la solution noirâtre obtenue, on précipite des flocons noirs légèrement acides ; c'est l'acide ulmique.

Des acides organiques coexistent dans le terreau avec l'acide ulmique ; de ce nombre est le tannin. Lorsque la proportion de tannin est trop considérable, ce

qui arrive pour la tourbe, le terreau arrête la végétation et brûle les plantes au lieu de leur être favorable.

Une terre arable comprend, en général, quatre éléments :

Du calcaire,
De l'argile,
Du sable,
De l'humus.

Nous ne dirons pas comment on procède à l'analyse des terres, nous l'avons expliqué dans notre *Traité de l'exécution des travaux* au chapitre IV.

Le calcaire porte avec lui les sulfates et phosphates nécessaires à la végétation, il rend la terre poreuse, légère et absorbante.

L'argile donne le liant ; elle porte avec elle les alcalis.

Le sable est une matière inerte qui divise la masse argileuse et l'empêche de devenir trop compacte et de se crevasser.

L'humus concourt à la fertilité, il divise la terre et lui fournit de la chaleur et de l'acide carbonique ; il est avide d'eau. Cependant, sa présence n'est pas indispensable.

La proportion des trois éléments principaux : sable, argile, calcaire, sert de base à la classification des terres.

Les terres argileuses comprennent les argiles pures, les argiles ferrugineuses et les marnes argileuses, impropres ou peu propres à la culture. Les terrains argilo-sableux donnent les terres fortes et les terres franches ; celles-ci conviennent le mieux à la culture.

Les sols sableux sont très-sensibles à la sécheresse lorsque la proportion de sable y est trop considérable et ne se cultivent qu'au moyen de l'irrigation. Les sols formés de sable pur ne conviennent qu'aux végétaux qui, comme les pins, tirent leur nourriture presque uniquement de l'atmosphère.

Les terrains calcaires, dont le type est la Champagne pouilleuse, sont arides et ingrats ; ils n'absorbent pas la chaleur comme le font les terrains à couleur foncée et c'est là une grande cause d'infériorité.

Les terrains volcaniques, très-riches en alcalis et très-foncés, acquièrent souvent une grande fécondité.

On connaît la réputation proverbiale de fertilité des terrains d'alluvion : il y a cependant des alluvions stériles, ce sont les alluvions sableuses, dans lesquelles la trituration et la désagrégation des matières premières n'ont pas été poussées assez loin pour les réduire à l'état de vase impalpable.

Les alluvions limoneuses sont seules fertiles, encore faut-il qu'elles ne proviennent pas d'un bassin uniquement calcaire. Les alluvions nouvelles surtout se font remarquer par leur force productive ; d'après les expériences de M. Daubrée, cette qualité serait due à une certaine proportion d'alcalis mis en liberté par la trituration prolongée des roches feldspathiques.

Les alluvions limoneuses épaisses, de même que les terres provenant des marais desséchés, quoique renfermant tous les éléments minéraux nécessaires à une végétation puissante, ne jouissent pas toujours d'une fertilité immédiate ; leur compacité est trop grande, il faut que la culture les aient rendues perméables à l'eau et à l'air.

Analyses de quelques terres végétales. — Il nous a paru intéressant de reproduire des analyses de quelques terres végétales prises en divers points de la France. Ces analyses, dues à de nombreux chimistes, sont extraites de la *Revue de géologie* de MM. Delesse et de Lapparent :

DÉSIGNATION DES TERRES	Eau.	Matière combustible.	Alumine et peroxyde de fer.	Chaux.	Magnésie.	Potasse.	Soude.	Acide phosphorique.	Résidu insoluble dans les acides.
Terre non fumée de Bezauche (Meurthe-et-Moselle), terre noire.	8,71	7,44	10,35	0,75	0,74	0,50	0,00	0,15	71,58
Terre fumée d'Angomont, grès Vosgien.	1,62	4,13	1,48	»	0,27	0,09	0,06	0,09	93,00
Terre fumée de Saint-Louis (Moselle), Keuper.	5,40	9,40	3,55	0,18	0,21	0,19	0,09	0,07	81,58
Forêt de Paroy (Meurthe-et-Moselle), diluvium.	7,17	9,92	7,84	0,46	0,96	0,33	0,09	0,13	73,50
Forêt de Signy (Ardennes), oxfordien.	2,15	3,95	3,83	0,26	0,05	0,15	0,02	0,17	89,45
Forêt de Saint-Michel (Aisne), silurien.	3,85	3,35	4,89	trace.	0,20	0,17	0,00	0,16	88,00
Forêt de Compiègne, sable glauconieux.	1,15	3,57	0,57	0,05	0,16	0,13	0,00	0,06	95,00
Forêt de Champfêtu, craie. . .	2,90	5,39	»	3,25	0,47	0,04	0,03	0,29	83,00
Forêt de Gerardmer, granite. .	8,22	12,18	9,28	trace.	0,34	0,31	0,00	0,23	70,00
Forêt d'Hérival (Vosges), grès rouge.	5,02	5,50	5,11	trace.	0,21	0,35	0,05	0,16	83,80

Ces analyses, faites par M. Grandeau sur des échantillons séchés à l'air libre, montrent que la richesse absolue en matière organique est la plus grande dans les terres fertiles sans fumure et dans les forêts.

D'après M. de Gasparin, la quantité d'acide phosphorique contenue dans une terre permet jusqu'à un certain point d'apprécier son degré de fertilité ; la terre est pauvre quand elle en a moins de $\frac{1}{2000}$, moyennement riche jusqu'à $\frac{1}{1000}$, riche jusqu'à $\frac{2}{1000}$ et très-riche au delà.

Analyse de la terre végétale de Beauvais, dépôt marno-sableux de la rivière du Thérain.

Silice.	Alumine et oxyde de fer.	Carbonate de chaux.	Sulfate de chaux.	Eau, matières organiques, sels solubles.	Perte.
56,5	6,1	26,5	3,1	7,5	0,3

Analyse d'un terrain de transport de la Vesle, près Reims ; la Vesle coule dans la craie.

Calcaire.	Silice.	Alumine et fer.	Magnésie.	Potasse.	Acide sulfurique.	Chlore.	Acide phosphorique.
52	31,5	10	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01

Analyse d'une terre d'alluvion de Graveson (Bouches-du-Rhône).

Carbonate de chaux.	Sable siliceux.	Argile.	Sulfate de chaux.	Sel marin.	Azote.	Matières organiques.	Eau.
49	23,5	17,75	0,62	1,15	0,11	5,62	2,25

Analyse de la terre de la lande de Granchamp (Bretagne).

Gravier quartzeux.	Silice.	Alumine et fer.	Chaux.	Sels alcalins.	Divers.	Eau et matières organiques.	Racines.
5,66	62,50	5,02	1,43	1,25	1,65	18,18	4,31

Analyse d'une terre végétale du Pays de Caux, près Fécamp.

Sable siliceux.	Argile.	Oxyde de fer.	Carbonate de chaux.	Carbonate de magnésie.	Eau.	Matières organiques.
77,65	2,05	2,55	11,64	0,23	0,19	5,71

Analyse d'une terre très-sablonneuse des Landes, près Morceux.

Azote et matières organiques.	Acide carbonique.	Oxyde de fer.	Alumine.	Chaux.	Magnésie.	Sable quartzeux.	Perte.
4,00	0,12	0,45	0,00	0,15	traces.	94,02	1,26

Analyse d'une terre d'alluvion de l'Oise, à 2 mètres de profondeur.

Eau.	Azote et matières organiques.	Acide carbonique.	Oxyde de fer.	Chaux, magnésie.	Silice insoluble.
1,90	1,72	0,50	4,29	0,55	91,04

Les recherches comparatives entreprises par MM. Feldhaus et von Schorlemer, pour apprécier l'influence exercée sur la terre végétale par son épaisseur ainsi que par sa richesse en humus, ont montré que la classe dans l'échelle de fertilité est d'autant plus élevée, que les terres ont une plus grande épaisseur et qu'elles sont plus riches en humus et en acide phosphorique.

QUALITÉS PHYSIQUES DES TERRES.

Les qualités physiques des terres ont une grande importance.

La coloration indique la capacité d'absorption du sol pour la chaleur solaire ; plus le sol est foncé, plus il emmagasine de chaleur et l'on sait combien la chaleur favorise le développement de la végétation. La coloration est produite par l'humus et l'oxyde de fer.

La faculté d'absorber l'eau et de la retenir, faculté qu'on désigne sous le nom d'hydroscopicité, est aussi d'une grande influence; nous avons vu combien l'évaporation et la végétation consommaient d'eau, et les pluies des saisons chaudes ne sont pas toujours suffisantes pour satisfaire à ces besoins; il est utile que la terre elle-même possède un certain approvisionnement d'humidité.

La densité et la ténacité des terres sont aussi pour l'agriculture des données intéressantes.

Voici les nombres généralement adoptés comme mesure des diverses qualités physiques des terres :

DENSITÉ DES TERRES.	
Sable calcaire	2,82
Sable siliceux	2,75
Glaise maigre (40 p. 0/0 de sable)	2,70
Glaise grasse (25 p. 0/0 de sable)	2,65

DENSITÉ DES TERRES.	
Terre argileuse (10 p. 0/0 de sable)	2,60
Argile pure	2,59
Terreau	1,22
Terre de jardin, légère et noire	2,33

Ces nombres représentent la densité vraie des molécules de la terre, densité déterminée par la méthode du flacon avec des échantillons pulvérisés.

Le poids du mètre cube de terre non pulvérisée est moindre, parce que la porosité intervient.

POIDS D'UN MÈTRE CUBE DES TERRES.			KILOGR.
1 mètre cube de	terre végétale ordinaire	pèse de	1200 à 1400
—	sable fin et sec	—	1400
—	sable fin et humide	—	1300
—	terre argileuse	—	1600
—	terre glaise	—	1900
—	marne	—	1600
—	terre de bruyère	—	650
—	tourbe sèche	—	510
—	tourbe humide	—	780

Les terres sont d'autant plus légères qu'elles renferment plus d'humus ou de matières végétales en décomposition ; elles ont une densité réelle d'autant plus forte qu'elles sont plus chargées de sable siliceux; quant au poids du mètre cube, il acquiert son maximum avec les glaises compactes.

HYDROSCOPICITÉ DES TERRES.

L'hydroscopité des terres a fait l'objet de nombreuses expériences de M. l'ingénieur Lamairesse qui est arrivé aux résultats suivants pour les roches et terres du Jura :

EAU ABSORBÉE PAR LES ROCHES. Volume absorbé par l'unité de poids,	
Granites	0,08
Porphyre	0,15
Basalte	0,01
Grès permien	0,40
Gypse saccharoïde	0,35
Oolithe rouge ferrugineuse	0,15
Grande oolithe	0,001
Calcaire oxfordien compacte	0,00
Calcaire d'eau douce	0,50
Craie verte de Limoges	0,34
Craie de Champagne	0,25 à 0,32

EAU ABSORBÉE PAR LES TERRES PULVÉRIS. ET DESSÉCHÉES. Litres d'eau absorbés par mètre cube.	
Argiles irisées	462
Marnes irisées, prés et vignes	475
Marnes du lias	475
Oolithe ferrugineuse	500
Craie de Lains	212
Argile blanche de Bresse	431
Argile noire	162
Terre tourbeuse de Bresse blanchât.	425
Argile siliceuse de Bresse	525
Terre blanche (silice presque pure)	387
Bonne terre de la vallée de la Seille	550

Les échantillons des roches ont séjourné dans l'eau pendant quatre ou cinq heures; pour les terres, il va sans dire qu'il s'agit de la quantité d'eau qu'elles peuvent retenir sans la laisser égoutter.

Le terreau retient beaucoup plus d'eau que toutes les terres.

MM. Meugy et Nivoit ont fait des expériences sur les quantités d'eau absorbées par des terres provenant de différentes roches de l'arrondissement de Vouziers (Ardennes). Voici, d'après la *Revue de Géologie*, les résultats de ces recherches :

« Les terres d'alluvions modernes, qui peuvent contenir 15 0/0 de carbonate de chaux, absorbent au plus 60 0/0 d'eau.

« Les terres limoneuses ou argilo-sableuses des alluvions anciennes en absorbent de 38 à 55 0/0.

« Les terres crayeuses de l'arrondissement de Vouziers, qui renferment en moyenne 75 0/0 de carbonate de chaux, absorbent de 50 à 60 0/0 d'eau ; celles des marnes crayeuses au maximum 70 0/0.

« Les terres gaizeuses, ayant au plus 1 0/0 de carbonate de chaux, absorbent seulement de 30 à 50 0/0 d'eau : cette proportion reste inférieure à celle trouvée habituellement dans les argiles, résultat qui doit être attribué à ce que la gaize est composée de silice en parcelles miscroscopiques, dont le pouvoir absorbant est moindre que celui de l'argile.

« Les terres du gault et des sables verts argileux absorbent de 50 à 75 0/0 ; celles du système kimméridien de 68 à 88 0/0 ; enfin celles du système oxfordien absorbent une quantité qui peut s'élever jusqu'à 110 0/0.

« On sait d'ailleurs que dans certaines argiles l'eau d'imbibition peut dépasser 150, qu'elle est supérieure à 200 dans l'écume de mer (hydrosilicate de magnésie) et qu'elle peut même atteindre 450 dans le carbonate de magnésie.

« On sait aussi que la proportion d'eau absorbée par les terres végétales dépend, non-seulement de la composition chimique de leurs éléments, mais encore de leur état de division ; elle est surtout en rapport avec les quantités d'humus et d'argile qu'elles contiennent (Tome XII de la *Revue de Géologie* de MM. Delesse et de Lapparent.) »

ADHÉRENCE DES TERRES

EFFORT A EXERCER PAR DÉCIMÈTRE CARRÉ POUR DÉTACHER LES TERRES D'UNE SURFACE EN BOIS DE HÊTRE.

Sable.	200 grammes.	Terre calcaire.	700 grammes.
Terre ordinaire légère	300 —	Terre argileuse. . . .	850 —
Glaise.	400 à 500 —	Argile pure.	1300 —

2° COMPOSITION ET DÉVELOPPEMENT DES VÉGÉTAUX.

Notre intention n'est point de donner ici des notions de physiologie végétale, que l'on trouvera du reste au chapitre Des Bois dans notre *Traité de l'exécution des travaux*. Nous voulons seulement rappeler les principales expériences et analyses faites sur la composition des végétaux, et indiquer sommairement où ils trouvent leur nourriture.

Composition moyenne des végétaux. — Les substances organiques sont, comme nous le savons, composées de quatre éléments : l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et le carbone. De la combinaison en proportions diverses de ces quatre éléments résulte une infinité de substances.

Ces quatre éléments ne sont pas directement assimilables par les animaux ; il faut, pour qu'ils le deviennent, qu'ils aient été soumis dans les végétaux à une préparation préalable. Les végétaux empruntent aux minéraux du sol, à l'eau et aux gaz de l'atmosphère toute leur substance ; celle-ci sert à former la substance animale qui, seule ou concurremment avec la substance végétale, sert à l'alimentation et au développement de tous les animaux.

Si les quatre éléments, oxygène, hydrogène, azote et carbone entrent pour la majeure partie dans la constitution des végétaux et des animaux, ils ne s'y trouvent pas seuls et l'adjonction des matières minérales leur est nécessaire. Les plus importantes de ces matières minérales sont le phosphore, la silice, la

potasse, la soude et la chaux. Lorsqu'on brûle une substance végétale ou animale, les parcelles minérales restent seules sous forme de cendres; on sait combien la proportion de cendres est généralement faible par rapport à la masse des corps qui les produisent.

D'après M. Ville, la composition moyenne des végétaux est résumée au tableau suivant :

	CARBONE.	HYDROGÈNE.	OXYGÈNE.	AZOTE.	ÉLÉMts MINÉRAUX OU CENDRES.
Plante entière	46,4	5,6	41.1	1,6	5,3
Racines	43,4	5,7	43,4	1,6	5,9
Tiges	46,9	5,3	39,6	1,0	2,6
Graines	47,4	6,0	41,1	2,6	2,9

Distinction des végétaux ligneux et des végétaux herbacés. — La moyenne précédente nous montre que les deux éléments prédominants de la substance végétale sont le carbone et l'oxygène, et que les éléments minéraux représentent toujours une faible partie du poids total.

Néanmoins, il existe sous ce rapport de grandes différences entre les divers végétaux.

Il en est qui donnent une proportion minime de cendres, ce sont les végétaux ligneux.

D'autres, au contraire, en donnent beaucoup plus, ce sont les végétaux herbacés.

La distinction est nettement établie par le tableau suivant qu'a donné M. Ville.

Dans 100 parties de végétal desséché on trouve, suivant la nature du végétal, les quantités ci-après de substances minérales :

ARBRES.	PROPORTION DE SUBSTANCES MINÉRALES.	HERBES.	PROPORTION DE SUBSTANCES MINÉRALES.
Peuplier	0,20	Foin	2,70
Érable	0,20	Maïs	4,10
Liége	0,20	Lin	4,10
Sapin	0,83	Feuille de seigle	4,00
Bouleau	1,00	Feuille de froment	4,40
Faux ébénier	1,25	Topinambours	8,40
Noisetier	1,57	Pois	8,10
Mûrier blanc	1,60	Luzernes	9.90
Sureau	1,60	Vesce	10,10
Acajou	1,60	Tabac de la Havane	11,25
Ébène	1,60	Tabac du départ. du Nord.	18,67
MOYENNE	0,99	MOYENNE	7,84

Ainsi, les arbres, en général, n'ont besoin que d'une proportion minime d'éléments minéraux; sous ce rapport, la composition du sol leur importe peu, ils ne demandent qu'une chose, c'est que leurs racines y trouvent un appui solide

et puissent y pénétrer facilement, en même temps qu'elles y rencontrent l'air et l'eau.

Les végétaux herbacés, au contraire, demandent beaucoup plus de matières minérales ; ils ne se développent que dans les terrains qui renferment celles de ces matières qui leur sont nécessaires, et, si le terrain n'est pas suffisamment pourvu, ils ne tardent pas à l'épuiser et à y dépérir.

« Les éléments minéraux, dit M. l'ingénieur Sartiaux, dans sa brochure sur les plantations des routes, viennent nécessairement du sol et les éléments organiques sont, en très-grande partie, empruntés à l'atmosphère, de telle sorte que, dans la culture des arbres, la constitution physique du sol a une importance prédominante sur la constitution chimique, c'est-à-dire que la nature du sol intéresse bien plus au point de vue de la faculté qu'il a de conserver les eaux pluviales en quantité convenable, d'absorber la chaleur, de laisser développer les racines de l'arbre, etc., qu'au point de vue des éléments chimiques qui le composent, puisque les arbres vivent presqu'entièrement des éléments qu'ils trouvent dans l'atmosphère. »

« Un chêne, un cèdre, un sapin, dit de son côté M. l'ingénieur Duponchel, dans son *Hydraulique agricole*, peuvent acquérir des dimensions énormes dans les anfractuosités d'une roche résistante, de même un pin dans des sables arides. Ils n'ont que peu de chose à emprunter au sol ; ils fixent à peu près uniquement du carbone qu'ils empruntent à l'atmosphère. La constitution physique du sol, la manière dont il se comporte au point de vue de l'aération des racines, de la conservation de l'humidité, de l'absorption de la chaleur, ont beaucoup plus d'influence sur la croissance des végétaux ligneux que la composition minérale de ce même sol.

« Le noyer, qui se plaît dans les sols calcaires, le châtaignier, dans les quartz et les schistes, le saule et le peuplier, dans les terrains frais et marécageux, ont une composition chimiquement peu différente quant au résidu fixe de leur combustion.

« Non-seulement la quantité de matières minérales formant la cendre du bois est toujours très-faible ; la nature même de ces substances peut encore varier avec celle du sol, pour la plupart des plantes vivant à l'état sauvage et chez quelques-unes de celles qui, bien que cultivées, ne servent pas à l'alimentation proprement dite, telles que le tabac et la vigne.

« La proportion des matières minérales est, au contraire, rigoureusement invariable dans toutes les plantes alimentaires. La composition des cendres de graines et de fourrages est constante pour une même espèce et ne varie que dans de très-étroites limites. »

Rendement et composition des principaux produits agricoles. — On trouve dans les traités d'agriculture, et l'*Annuaire météorologique* a reproduit, dans ces dernières années, de précieux renseignements sur le rendement et la composition des céréales et des fourrages qui sont les principaux produits de l'agriculture. Nous avons résumé ces renseignements sous forme de tableaux :

DÉSIGNATION DES PRODUITS.	POIDS MOYEN DE L'HECTOLITRE. kilogr.	QUANT. DE SEMENCE PAR HECTARE. litres.	RENDEMENT A L'HECTARE						POIDS DE PAILLE A L'HECTARE.	PROPORTION P. 100 DU GRAIN.	PROPORTION P. 100 DE LA PAILLE.
			MINIMUM.		MOYEN.		MAXIMUM.				
			Hectol.	kilogr.	hectol.	kilogr.	hectol.	kilogr.			
Blé ou froment.	76	120 à 150	6	456	12	912	45	3420	2000 à 6000	29	71
Seigle	72	200 à 250	10	720	22	1584	35	2520	3500	31	69
Orge de printps.	56	250 à 300	15	840	26	1456	40	2240	2000	37	63
Orge d'hiv. (escourg.)	64	200 à 300	19	1216	30	1920	44	2816	2500	43	57
Avoine.	47	220 à 230	21	987	40	1880	67	3059	3000	38	62
Sarrasin. . . .	58	50 à 140	15	870	18	1040	60	3480	1000 à 4000	»	»
Maïs.	67	30 à 40	30	2010	45	3015	60	4020	2800	»	»

COMPOSITION MOYENNE DES PRODUITS PRÉCÉDENTS

(Composition rapportée à 100 parties en poids.)

DÉSIGNATION DU PRODUIT.	GLUTEN ET ALBUMINE. (Matières azotées)	AMIDON ET DEXTRINE.	MATIÈRES GRASSES.	LIGNEUX CELLULOSE.	SUBSTANCES MINÉRALES.	EAU.
Blé.	14,6	66,9	1,2	1,7	1,6	14
Seigle.	9,0	67,5	2,0	3,0	1,9	16,6
Orge.	13,4	63,7	2,8	2,6	4,5	13,0
Avoine.	11,9	61,5	5,5	4,1	3,0	14,0
Maïs.	12,8	60,5	7,0	1,5	1,1	17,1

RAPPORT MOYEN DES QUANTITÉS DE SON ET DE FARINE POUR CENT PARTIES

	ÉPEAUTRE.	BLÉ A BARBES.	BLÉ ROUGE D'ÉGYPTE.	FROMENT DU NORD.	FROMENT DE RUSSIE.	SEIGLE.	ORGE.	AVOINE.
Son . . .	20,8	13,2	15	20,5	18	24	24	22
Farine. .	79,2	86,8	85	79,5	82	76	76	78

POIDS DES SUBSTANCES MINÉRALES CONTENUES DANS 1 KILOGRAMME DES PRODUITS SUIVANTS

(Poids exprimé en grammes.)

DÉSIGNATION DES PRODUITS.	AZOTE.	SILICE.	ACIDE PHOSPHORIQUE	ACIDE SULFURIQUE.	SOUFRE.	POTASSE.	SOUDE.	MAGNÉSIE.	CHAUX.	CENDRES.	EAU.	CHLORE.
Blé en tuyaux. . . .	»	9,4	1,7	0,4	0,3	7,8	0,4	0,3	1,1	22,4	770	1,2
Blé en fleur.	»	12,3	1,6	0,4	0,5	5,6	0,1	0,5	0,7	21,7	690	0,6
Paille de blé.. . . .	3,2	28,2	2,3	1,2	1,6	4,9	1,2	1,1	2,6	42,6	141	»
Grain de blé.	20,8	0,3	8,2	0,4	1,5	5,5	0,6	2,2	0,6	17,7	143	»
Grain de seigle. . . .	17,6	0,3	8,2	0,4	1,7	5,4	0,3	1,9	0,5	17,3	149	»
Paille sèche de seigle. .	2,4	23,7	1,9	0,8	0,9	7,6	1,3	1,3	3,1	40,7	154	»
Grain d'orge.	16,0	5,9	7,2	0,4	1,4	4,8	0,6	1,8	0,5	21,8	145	»
Paille sèche d'orge. .	4,8	23,6	1,9	1,6	1,3	9,3	2,0	1,1	3,3	43,9	140	»
Grain d'avoine. . . .	17,9	12,3	5,5	0,5	1,7	4,2	1,0	1,8	1,0	26,4	140	»
Paille sèche d'avoine. .	4,0	22,1	1,8	1,5	1,7	9,7	2,3	1,8	3,6	44,0	141	»
Grain de sarrasin. . .	14,4	»	4,4	0,2	»	2,1	0,6	1,2	0,3	9,2	141	»
Paille sèche de sarrazin.	13,0	2,8	6,1	2,7	»	24,1	1,1	1,9	9,5	51,7	161	»
Grain de maïs. . . .	16,0	0,3	5,5	0,1	1,2	3,3	0,2	1,8	0,3	12,3	136	»
Paille sèche de maïs. .	4,8	17,9	3,8	2,5	3,9	16,6	1,5	2,6	5,0	47,2	140	»

Les tableaux précédents nous permettent de calculer le poids de substances minérales qu'emporte sur un hectare de terre une récolte moyenne de chaque espèce de céréales.

On conçoit que c'est une question intéressante à élucider, car, si on connaît ce qu'une moisson enlève de matières minérales, on connait par celà même ce qu'il faut ajouter au sol pour lui maintenir une composition constante et le mettre en état de donner une nouvelle récolte égale à la première sans qu'il soit appauvri.

POIDS DES SUBSTANCES MINÉRALES ENLEVÉES SUR UN HECTARE

PAR UNE RÉCOLTE MOYENNE.

DÉSIGNATION DES PRODUITS.		kilogr.		AZOTE. kilogr.	ACIDE PHOSPHORIQUE kilogr.	POTASSE ET SOUDE. kilogr.	CHAUX ET MAGNÉSIE. kilogr.
Blé. . .	25 hect. de grain pesant Paille.	1900 4700	6600	54,56	26,39	40,26	22,71
Seigle. .	25 hect. de grain pesant Paille.	1800 3900	5700	41,04	22,17	44,97	21,48
Orge. .	Poids du grain.. . . . Poids de la paille.. . .	1900 2500	4400	42,40	18,43	38,51	15,37
Aveine. .	Poids du grain. . . . Poids de la paille.. . .	1900 3000	4900	46,01	15,85	45,88	21,52
Sarrazin.	Poids du grain.. . . . Poids de la paille.. . .	1500 2000	3500	47,60	18,80	54,45	25,05
Maïs. .	Poids du grain.. . . . Poids de la paille. . .	3000 3000	6000	62,40	27,90	64,80	29,10

RENDEMENT DES FOURRAGES A L'HECTARE.	KILOGRAMMES.
Seigle coupé en vert.	10,000 à 25,000
Orge d'hiver ou escourgeon coupé en vert	15,000 à 20,000
Avoine coupée en vert..	15,000 à 20,000
Sarrasin coupé en vert.	15,000 à 20,000
Maïs coupé en vert.	20,000 à 40,000
Trèfle, fourrage vert.	25,000 à 35,000
Trèfle, fourrage sec..	6,000 à 9,000
Luzerne, fourrage vert..	20,000 à 30,000
Luzerne, fourrage sec.	6,000 à 9,000
Sainfoin, fourrage sec..	5,000 à 10,000
Vesce ou bisaille, fourrage vert.	18,000 à 20,000
— fourrage sec..	4,000 à 5,000
Foin des prairies naturelles, fourrage vert	15,000 à 18,000
— fourrage sec.	5,000 à 6,000

POIDS DES SUBSTANCES MINÉRALES

CONTENUES DANS UN KILOGRAMME DE FOURRAGE (GRAMMES).

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	SEIGLE COUPÉ EN VERT	ORGE EN FLEUR.	AVOINE EN FLEUR.	SARRAZIN EN VERT.	MAÏS EN VERT.	TRÈFLE ROUGE		LUZERNE.		SAINFOIN SEC.	FOIN des prairies nat.	
						Sec.	en vert.	Sèche.	en vert.		Sec.	Vert.
Azote.	4,3	3,6	3,8	5,1	3,2	21,3	5,9	23,0	7,2	23,0	13,1	4,4
Silice.	5,2	10,8	5,5	0,4	1,1	1,5	0,4	1,2	0,4	0,8	19,7	6,9
Acide phosphorique. .	2,4	2,2	1,4	1,1	0,7	5,6	1,3	5,1	1,5	7,3	4,1	1,5
Acide sulfurique. . .	0,2	0,7	0,5	0,5	0,3	1,7	0,4	3,7	1,1	»	3,4	1,2
Soufre..	»	0,7	0,4	»	»	2,1	0,5	2,6	0,8	»	1,7	0,6
Chlore..	»	0,8	0,7	»	»	2,1	0,5	1,1	0,3	»	5,3	1,9
Potasse.	6,3	5,9	6,5	4,5	2,4	19,5	4,6	15,2	4,5	4,8	17,1	6,0
Soude.	0,1	0,1	0,6	0,2	0,1	0,9	0,2	0,7	0,2	2,5	4,7	1,6
Magnésie..	0,5	0,7	0,5	3,7	0,1	6,9	1,6	3,5	1,0	3,3	3,5	1,1
Chaux..	1,2	1,4	1,1	6,6	1,2	19,2	4,6	28,8	8,5	22,7	7,7	2,7
Cendres.	16,3	22,5	16,6	17,6	8,2	56,5	13,4	60,0	17,6	»	66,6	23,3
Eau..	700,0	680,0	770,0	828,0	852,0	160,0	800,0	160,0	753,0	»	144,0	700,0

POIDS EN KILOGRAMMES DES SUBSTANCES MINÉRALES ENLEVÉES SUR UN HECTARE

PAR LES FOURRAGES ET LES PRODUITS CI-APRÈS :

DÉSIGNATION DES FOURRAGES.	AZOTE (kilogrammes).	ACIDE PHOSPHORIQUE	POTASSE ET SOUDE.	CHAUX ET MAGNÉSIE.
Seigle coupé en vert. . 15000 kil. à l'hectare.	64,5	36	96	25,5
Orge coupé en vert. . —	54	33	90	31,5
Avoine coupée en vert. —	57	21	106,5	24
Sarrazin coupé en vert. —	76,5	16,5	70,5	154,5
Maïs coupé en vert. . 30000 —	96	21	75	39
Trèfle rouge coupé en vert. 30000 —	177	39	144	186
Luzerne coupée en vert 25000 —	180	37,5	117,5	237,5
Sainfoin. . 5000 kil. de fourrage sec.	118,6	37,6	37,7	133,5
Vesce. . . 19000 kil. de fourrage vert.	91,2	38,0	134,9	98,8
Prairie nat. 15000 kil. de foin vert par an. . .	72,0	22,5	119,9	60,5
AUTRES PRODUITS.				
Betteraves à bestiaux. { racines. . 30000 kil. / feuilles.. . 11000 kil.	84	32,8	246,4	58,1
Carottes. . . . . { racines.. . 40000 kil. / feuilles. . 8000 kil.	124,8	53,6	281,6	134,4
Pommes de terre, tubercules.	48,0	27,0	85,5	9,0

De la nutrition des végétaux. — Les végétaux se nourrissent partie dans l'atmosphère, partie dans la terre. Nous avons montré la différence qui existait sous ce rappport entre les végétaux herbacés et les végétaux ligneux. Nous rappellerons sommairement les principales relations des végétaux avec l'atmosphère et avec la terre.

1° Rôle de l'atmosphère. — L'air atmosphérique est, comme nous savons, composé de deux éléments, l'oxygène et l'azote dans les proportions suivantes :

En volume.	20,8 d'oxygène. 79,2 d'azote.	En poids.	23 d'oxygène. 77 d'azote.

Mais à ces deux gaz sont mélangées, en proportion minime il est vrai, bien d'autres substances capables d'exercer une influence sérieuse sur les végétaux qui se développent au fond de l'océan aérien. Si l'on réfléchit à la masse énorme de l'air qui se renouvelle autour d'une plante, on reconnaît qu'en somme cette plante finit par se trouver en contact avec une grande quantité des matières dont la proportion dans l'atmosphère est des plus faibles.

Acide carbonique. — Si l'on recherche l'acide carbonique contenu dans 10 000 volumes d'air, on trouve qu'en moyenne il y en a quatre volumes.

Sous l'influence de la végétation dans une plaine cultivée, on reconnaît que la proportion d'acide carbonique est plus grande pendant la nuit que pendant le jour, et elle diminue d'autant plus pendant le jour que le soleil est plus ardent : en effet avec la chaleur augmente l'absorption de l'acide carbonique par les parties vertes des plantes et la fixation du carbone.

M. Truchot a trouvé que 10 000 volumes d'air dans une région couverte de végétaux renfermaient :

Pendant le jour, au soleil.	3,5 vol.	d'acide carbonique.
— par un temps couvert.	4,1	—
— la nuit.	6,5	—

L'acide carbonique étant plus lourd que l'air s'accumule dans les parties basses de l'atmosphère, aussi la proportion diminue-t-elle assez rapidement avec l'altitude. A 1 500 mètres il n'y en a plus que 2 volumes dans 10 000 volumes d'air.

Vapeur d'eau. — Il y a toujours une notable quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère; les observations hygrométriques permettent de l'apprécier. Elle est très-variable avec la chaleur et les vents.

Acide azotique. — L'acide azotique se trouve toujours dans les eaux de pluie : il n'existe pas seulement dans les pluies d'orage comme on l'avait cru pendant longtemps.

Pendant les six derniers mois de 1851, M. Barral a trouvé qu'il était tombé à l'Observatoire de Paris sur une surface d'un hectare 30 kilogrammes d'acide azotique apporté par la pluie.

Ammoniaque. — L'ammoniaque se trouve toujours dans les eaux de pluie, où l'on pense que cet alcali existe à l'état d'azotate d'ammoniaque.

Pendant les six derniers mois de 1851, M. Barral a trouvé qu'il était tombé à l'Observatoire de Paris sur une surface d'un hectare 7 kilogr. 7 d'ammoniaque.

M. Truchot a montré que la proportion d'ammoniaque augmentait à mesure qu'on s'élevait dans l'atmosphère.

Substances minérales. — L'eau de pluie renferme, outre les gaz de l'atmosphère, des poussières minérales en suspension et en dissolution.

A Caen, d'après M. Isidore Pierre, un hectare de terre reçoit :

kilogram.		kilogram.	
37,5	de chlorure de sodium ou sel marin.	8,4	de sulfate de potasse.
8,2	— de potassium.	8,0	— de soude.
2,5	— de magnésium.	6,2	— de chaux.
1,8	— de calcium.	5,9	— de magnésie.

Ces nombres supposent qu'il tombe $0^{m},60$ de pluie par an et qu'un mètre cube d'eau pluviale renferme 24 à 25 grammes de matières minérales.

En résumé dit l'*Annuaire météorologiqne*, dans un mètre cube d'air pesant 1 290 grammes on trouve :

$294^{gr},915$	d'oxygène,
$985^{gr},993$	d'azote,
$6^{gr},757$	de vapeur d'eau.
$0^{gr},811$	d'acide carbonique.
$1288^{gr},476$	

Respiration des plantes. — Les plantes respirent comme les animaux, elles absorbent de l'oxygène et rendent à l'atmosphère de l'acide carbonique.

L'oxygène est nécessaire à la plante pour les principaux actes de sa vie : la germination, la floraison et la maturation.

Pendant la germination, la graine s'oxyde ; elle absorbe de l'oxygène et brûle son carbone, elle diminue de poids bien qu'elle augmente de volume.

Décomposition de l'acide carbonique pendant le jour. — La respiration des plantes persiste jour et nuit ; mais, pendant le jour, elle se trouve masquée par un phénomène inverse beaucoup plus important. C'est l'absorption de l'acide carbonique par les parties vertes des plantes, sa décomposition à l'intérieur du végétal et la fixation du carbone qui constitue la plus grande partie de la masse ligneuse.

Ce phénomène ne se produit que par les parties vertes et sous l'influence de la lumière ; il est d'autant plus actif que la chaleur est plus vive. On voit là la raison pour laquelle les années chaudes, si elles ne sont pas trop sèches, se font remarquer par des moissons abondantes.

Le carbone des plantes provient bien de l'atmosphère, car, si l'on considère des plantes cultivées dans un terrain artificiel dépourvu de toute substance organique, on constate dans ces plantes une quantité de carbone incomparablement plus grande que celle qui existait dans la graine.

Les plantes, plongées dans une atmosphère dénuée d'acide carbonique, ne tardent pas à périr.

On estime que le carbone fixé en France sur 41 millions d'hectares de terre en culture, s'élève à 60 millions de tonnes.

D'après Liebig, la quantité de carbone fixé par un hectare de terre en culture est sensiblement constante et s'élève annuellement à environ 2 000 kilogrammes.

D'après cela, la quantité de carbone fixé ne dépendrait pas de la composition du sol : c'est, en somme, un travail mécanique qui se fait par la chaleur solaire. Ce travail paraît donc ne dépendre que de la quantité de chaleur solaire absorbée par les plantes en une année.

Ainsi, bien que l'acide carbonique dégagé par les matières organiques contenues dans le sol puisse concourir à la nutrition des plantes, on peut dire que

le carbone est presque uniquement puisé dans l'atmosphère, immense réservoir dont les pertes se réparent sans cesse. Il n'y a donc pas à s'inquiéter de fournir aux plantes soit l'oxygène, soit l'acide carbonique.

La combustion des composés organiques du sol et en particulier de l'humus est plutôt utile comme source de chaleur que comme source d'acide carbonique.

Assimilation de l'azote. — Considérons une récolte de luzerne de 25 000 kilogrammes à l'hectare; cette luzerne renferme 180 kilogrammes d'azote. Quelle est la provenance de cet azote ?

Tout d'abord, on se dit que l'atmosphère est une source inépuisable d'azote puisqu'elle en renferme les $\frac{4}{5}$ de son volume.

Malheureusement, l'azote de l'atmosphère est un corps inerte, qui n'est pas directement assimilable par les plantes.

Ce sont les composés nitreux, l'acide azotique et l'ammoniaque qui donnent de l'azote aux végétaux, et, comme la pluie renferme ces composés, elle fournit aux plantes une partie de ce dont elles ont besoin.

Si l'on expérimente des sols artificiels dénués de matière organiques et mélangés de sels divers, on reconnaît que l'absorption de l'azote par la plante se fait lorsqu'on ajoute au sol du nitrate d'ammoniaque.

Une atmosphère chargée de vapeurs ammoniacales est très-favorable à la végétation et les plantes y acquièrent un développement plus rapide.

L'azote de l'air concourt avantageusement à la végétation, mais il ne peut seul y suffire; l'azote assimilable est surtout fourni par les engrais organiques. Un sol s'épuise vite et devient rapidement infertile lorsqu'on l'abandonne aux seules ressources de l'atmosphère et qu'on ne renouvelle pas sa provision d'engrais azotés.

2° Rôle du sol. — C'est donc le sol qui est chargé de fournir aux végétaux la plus grande part de l'azote. C'est lui aussi qui leur donne les éléments minéraux; les eaux de pluie renferment bien à l'état de poussière ou de dissolution des minéraux utiles aux plantes, mais la proportion n'en est pas assez considérable ; du reste, la teneur de l'eau de pluie en minéraux est à peu près constante, tandis que les diverses cultures ont besoin de minéraux divers que le sol doit leur fournir.

L'eau est le véhicule par lequel les substances organiques et minérales passent du sol dans les végétaux; ce sont les radicelles qui les absorbent.

Nous ne reviendrons pas sur l'énorme consommation d'eau qu'entraîne la végétation; nous avons traité cette question en parlant de l'évaporation terrestre et de l'appauvrissement des nappes souterraines.

« Quel est en réalité, dit M. Marié-Davy, le rôle de l'eau dans la végétation ?

La transpiration de la plante n'est pas le but ; elle n'est qu'un moyen. Elle a pour objet l'introduction dans l'organisme végétal des substances minérales nécessaires à l'élaboration de ses tissus et des principes qui y sont rassemblés. Faut-il toujours la même quantité d'eau pour fournir la même masse de matière minérale et pour opérer dans la plante toutes les élaborations et migrations de produits organisés qui doivent s'y produire ?

Il paraît évident que dans les terres plus ou moins fertiles, contenant en quantités inégales les principes solubles et assimilables, l'eau aspirée par les racines peut être plus ou moins chargée de ces principes ; on comprend donc que le volume d'eau nécessaire à une plante pour fournir un rendement déterminé ne doive pas être le même pour toutes les terres et que les plus riches puissent donner un rendement plus fort avec une consommation d'eau propor-

tionnellement plus faible. On arriverait donc, par un accroissement de la richesse de la terre en matières solubles assimilables, à une économie dans le volume des eaux consommées par les récoltes. »

3° CULTURE RATIONNELLE.

Engrais et amendements. — Nous venons de déterminer d'une part la composition des terres, d'autre part la composition des végétaux qu'elles produisent. Nous savons maintenant calculer ce qu'une récolte déterminée enlève chaque année à la terre et nous pouvons dire ce qu'il faut rendre à celle-ci pour la mettre en état de produire une nouvelle récolte. La terre est la nourrice du genre humain, mais c'est une nourrice dont il faut sans cesse réparer les forces et dont l'appétit s'accroît avec le nombre de ses nourrissons.

C'est avec les engrais et les amendements qu'on met la terre en état de produire sans cesse de nouvelles récoltes.

On entend par *engrais* toutes les matières qui renferment sous une forme immédiatement assimilable les éléments nécessaires à la végétation.

On entend par *amendements* toutes les matières qui ont pour effet soit de modifier la constitution physique d'une terre, soit de déterminer à l'intérieur du sol des réactions chimiques capables de mettre en liberté les substances directement assimilables par les plantes.

La distinction entre les engrais et les amendements n'est pas nette, et cela se conçoit, car beaucoup de substances possèdent à la fois les qualités de l'engrais et celles de l'amendement.

Le principal engrais est le fumier de ferme. Viennent ensuite toutes les matières animales ou végétales : les guanos et la colombine, les excréments de toute nature, les détritus des abattoirs, le sang, la viande, les os, les débris de cornes et de laines, les tourteaux et les marcs, les produits des égouts et de la voirie, les plantes enterrées en vert, les plantes marines chargées de sels alcalins, les produits minéraux directement assimilables, tels que certains phosphates, des sels alcalins et des cendres, etc.

Parmi les amendements, nous citerons les marnes, qui, employées sur les terres meubles et sèches, leur permettent de conserver de l'humidité et de moins se déliter à terre, les sables et terres sablonneuses qui font perdre aux terres fortes et aux argiles leur excessive compacité et les rendent perméables à l'air et à l'eau. La chaux et le plâtre agissent comme amendements et engrais ; pour les terrains dépourvus de calcaires, comme les terrains granitiques de la Bretagne, la chaux est un véritable engrais. D'autres amendements, comme les terres neuves, les produits des curages, la suie, les cendres agissent à la fois comme amendements et comme engrais.

L'eau est un engrais et un amendement ; l'eau pure agit surtout comme amendement, elle est le véhicule qui fournit aux plantes leur nourriture ; sans elle, toute végétation s'arrête. Elle dissout les sels minéraux et leur permet de pénétrer par les racines dans le corps du végétal. Mais, l'eau d'irrigation, si elle est pure, ne diminue pas la consommation des engrais, ainsi qu'on est trop souvent porté à le croire ; elle l'augmente, au contraire, puisqu'elle augmente dans une large proportion l'assimilation de toutes les substances.

Dans les irrigations, on cherche autant que possible à employer une eau chargée de matières fertilisantes : telles sont, en général, les eaux troubles et limoneuses, qui cependant dispensent bien rarement de recourir aux engrais. Il faut, pour que les eaux portent avec elles assez d'engrais, qu'elles se trouvent dans des circonstances toutes particulières ; on cite, sous ce rapport, les eaux employées à l'irrigation aux environs de Milan ; elles proviennent d'un canal qui reçoit toutes les déjections de la ville et, par conséquent, elles possèdent un excès de matières animales et végétales.

Comme exemple d'un cas où la chaux est non-seulement un amendement, mais encore un engrais puissant, nous citerons la Sologne :

« Le sol y consiste, dit M. l'ingénieur en chef Sainjon, en terrains de transport exclusivement argilo-siliceux et présentant toutes les variétés, depuis les sables purs jusqu'aux argiles compactes. Cette constitution n'est pas seulement celle de la surface ; elle se reproduit jusqu'à de grandes profondeurs et l'on a poussé sur beaucoup de points des sondages à plus de 60 mètres sans rencontrer l'élément calcaire. »

On n'est arrivé à transformer ce sol infertile qu'en y créant de nombreuses voies de transport permettant d'y amener relativement à bon marché les amendements calcaires.

On sait toute la faveur qu'ont prise dans ces derniers temps les engrais minéraux et notamment les phosphates de chaux. C'est à M. de Molon que l'on doit en France les premières recherches et les premières applications de la chaux phosphatée. Les principaux gisements sont aujourd'hui exploités dans le Lot et dans le Tarn-et-Garonne, et l'on pourra consulter sur la question une notice de M. l'ingénieur Thurninger, insérée aux *Annales des ponts et chaussées de* 1874.

Les phosphates du Quercy, qui renferment jusqu'à 85 pour 100 de phosphate tribasique de chaux, sont solubles dans les eaux légèrement acides. La seule manipulation qu'ils exigent pour être rendus assimilables par les plantes, dit M. Thurninger, est une pulvérisation aussi fine que possible ; ainsi réduits en poudre, ils donnent d'excellents résultats, simplement répandus sur la terre dans les sols riches ou arides tels que les sols granitiques, ou mélangés avec du fumier à raison de 400 à 500 kilogrammes par hectare dans les autres terrains.

Au contraire, les phosphates de l'Estramadure, qu'exploite l'Angleterre et qui renferment 70 p. 100 de phosphate tribasique de chaux, ne deviennent assimilables par les végétaux que s'ils sont transformés en superphosphates au moyen d'un traitement par l'acide sulfurique qui augmente dans une forte proportion le prix de l'engrais.

Pour terminer ces considérations générales, nous donnerons la composition du fumier d'étables et nous calculerons combien on doit employer de ce fumier dans une culture rationnelle.

COMPOSITION DE 1,000 KILOGRAMMES DE FUMIER D'ÉTABLE.

	AZOTE.	ACIDE PHOSPHORIQUE.	POTASSE ET SOUDE.	MAGNÉSIE ET CHAUX.
Fumier frais.	$4^{k}5$	$2^{k}1$	$6^{k}6$	$7^{k}1$
Fumier à demi consommé.	5,0	3,5	9,0	9,4
Fumier consommé.	5,8	3,4	5,8	11,6

Le fumier à demi consommé pèse 750 kilogrammes le mètre cube et renferme 75 p. 100 d'eau.

Veut-on savoir quelle quantité de fumier on doit fournir tous les trois ans à une terre dont l'assolement est triennal sans jachère, c'est-à-dire qui porte, la première année, du blé, la seconde année, de l'avoine, et, la troisième année, du trèfle.

Voici les quantités de substances minérales enlevées à la terre par les trois récoltes :

	AZOTE.	ACIDE PHOSPHORIQUE.	POTASSE ET SOUDE.	MAGNÉSIE ET CHAUX.
Première année. — Blé.	54k56	26k39	40k26	22k71
Deuxième année. — Avoine.	46,01	15,85	45,88	21,52
Troisième année. — Trèfle..	179,00	39	144	186,00
TOTAL.	277,57	81,24	230,14	230,23

Pour restituer complétement l'azote, il faudrait employer 55 000 kilogrammes de fumier à demi consommé.

Mais, si nous admettons avec M. Barral que la pluie apporte par an sur un hectare 60 kilogrammes d'acide azotique et 15 kilogrammes d'ammoniaque, soit 27 kilogrammes d'azote, cela fait pour les trois années un apport de 81 kilogrammes. Reste à peine 200 kilogrammes d'azote à trouver, ce qui correspond à 40 000 kilogrammes de fumier d'étable.

Or, 40 000 kilogrammes de fumier d'étable à demi consommé renferment 140 kilogrammes d'acide phosphorique, 360 kilogrammes d'alcalis et 376 kilogrammes de chaux et magnésie. Il y aurait donc excès de ces trois substances ; il suffira, en général, d'assurer la restitution de l'acide phosphorique ; c'est l'élément le plus important et, pour cela, 30 000 kilogrammes de fumier suffiront.

PRINCIPES DE LA CULTURE RATIONNELLE

Les principes de la culture rationnelle ont été mis en lumière et nettement exposés par l'éminent chimiste baron Justus de Liebig. Nous ne pouvons mieux faire que de reproduire ici la traduction de M. Michel Rempp, traduction qui renferme la théorie générale de la culture rationnelle et des matières fertilisantes. (Cette traduction a été insérée dans les Rapports du jury international de l'Exposition de 1867.)

1° THÉORIE GÉNÉRALE.

Les considérations qu'on va lire pourront permettre d'apprécier l'importance et la valeur relatives des différents engrais employés en agriculture. Dans tous les pays où l'agriculture remonte à des siècles, elle se fonde sur l'emploi du fumier. L'idée du fumier implique bien toujours celle d'engrais, mais tout engrais

n'est pas du fumier. Toutes les exploitations agricoles en Europe s'appuient si généralement sur le fumier d'étable, que, sans l'emploi de ce fumier, on semble ne pas concevoir la possibilité d'un rendement convenablement rémunérateur.

§ 1er. — Système rationnel de culture.

Il existe, en culture, une méthode rationnelle et une qui ne l'est pas. Par la première, il faut entendre une culture fondée sur les principes de la raison et de l'expérience, garantissant une productivité indéfinie des champs, et de nature à l'augmenter encore selon les circonstances. L'autre méthode est, au contraire, un mode d'exploitation épuisant et périlleux, parce qu'il use la faculté reproductive des champs, dont il réduit constamment le rendement. La pire exploitation est donc, bien entendu, celle qui conduit le plus promptement à l'épuisement des terres par l'effet de l'exploitation même.

Les analyses les plus minutieuses et les plus exactes du sol arable ont prouvé que, dans la plus grande partie des terres cultivables en Europe, certaines substances, que le sol doit nécessairement contenir pour produire des céréales et autres récoltes, ne s'y rencontrent qu'en proportions très-minimes, et que l'homme le plus doué de pénétration et d'art n'est pas capable, en l'absence de ces éléments, d'obtenir des terres un rendement élevé. Tels sont les faits d'après lesquels on peut apprécier les différents modes d'exploitation agricole.

Si nous supposons une petite propriété rurale qui produise en céréales, en viande, en lait, etc., les quantités nécessaires à la nourriture d'une famille de cinq personnes, et que toutes les céréales récoltées y soient consommées comme pain, toutes les pommes de terre, tous les pois et autres produits du même genre comme légumes; que le trèfle, le foin, etc., employés pour l'entretien d'une vache ou d'une chèvre, soient consommés par la famille sous forme de viande, et de lait, tout ce que les champs ont livré en produits ci-dessus reste sur le fonds de terre comme produits excrémentiels, liquides et solides, des animaux et des hommes, ou comme paille, déchets et débris de cuisine. Ces résidus composent le fumier et le purin.

Les éléments qui servent à la production des plantes s'appellent principes *nutritifs* quand ils font partie du sol, et *engrais* quand ils sont apportés par le fumier d'étable et le purin. Principes nutritifs et engrais sont donc une même chose, et l'on doit comprendre que l'on puisse facilement retrouver par le fumier d'étable et le purin, pour les rendre à la terre, toute la somme des principes nutritifs qui ont passé dans les plantes et qui lui ont été enlevés sous forme de récoltes. Il est clair que, lorsque cette restitution a lieu, soit chaque année, soit de trois en trois ou de quatre en quatre ans, c'est-à-dire lorsque le champ a reçu par la *fumure*, comme on appelle cette opération, sa part sous forme de fumier et de purin, des principes nutritifs qu'il avait donnés, il devra se retrouver dans le même état qu'avant d'avoir fourni la récolte; et, dans les mêmes conditions de chaleur et de pluie, il produira de nouveau la même récolte en céréales, pommes de terre, pois, trèfle, foin, etc., telle qu'il l'avait produite l'année précédente.

Voilà la méthode de culture rationnelle par laquelle les champs conserveront toujours leur fertilité et suffiront à nourrir cette même famille de cinq personnes, car les mêmes causes doivent toujours produire les mêmes effets. Lorsque le cultivateur ne recueille pas avec soin son fumier, lorsqu'il le vend ou qu'il

laisse son purin se perdre dans les rues du village au lieu de le répandre sur ses champs, sa culture cesse d'être rationnelle, et les produits de son exploitation manqueront à un moment donné en tout ou en partie.

Pour l'exploitation du fonds de terre dont nous venons de parler, toutes les forces productives de cette famille de cinq personnes ne sont pas entièrement indispensables, et si nous admettons que la moitié suffise, elle tirera parti de l'autre moitié en travail de louage; elle pourra alors retirer un revenu suffisant pour couvrir et ses frais et ses besoins en vêtements, logement, chauffage, ustensiles et médicaments.

Les conditions sont différentes quand une famille de cinq personnes cultive une plus grande étendue de terre, le double, par exemple, de celle dont nous venons de parler. Dans ce cas, il faudra qu'elle consacre à l'exploitation la somme entière de ses forces productives; mais alors elle recueillera une quantité double de ce qui lui est nécessaire pour sa nourriture, ce qui lui permettra d'en vendre la moitié pour subvenir à ses autres besoins que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire les vêtements, les ustensiles, etc. Dans ce cas, la moitié du produit des champs en céréales, lait, viande, que cette famille porte au marché, contient une partie équivalente des principes nutritifs qui ont servi à la terre pour les produire, et par conséquent la somme de ces principes qui sont l'origine de la croissance des plantes ne sera pas rendue à la terre; or, il est évident que, dans le premier exemple, tous les éléments sont convertis en fumier et rendus au sol, tandis que dans le second, au contraire, les terres ne recouvrent que la moitié de ce qu'elles ont livré.

§ II. — Exploitation épuisante.

La quantité de fumier qui peut être recueillie sur le second fonds de terre n'est pas plus grande que celle fournie par le premier fonds; elle aurait dû être le double si tous les champs du second fonds avaient reçu autant d'engrais que ceux du premier et donné le même rendement.

L'exploitation continuant ainsi, la perte des principes nécessaires à la fertilité du sol devient plus grande d'année en année; en d'autres termes, la fertilité diminue. Quelque grande donc qu'ait été au commencement la somme des principes nutritifs déposés dans le sol, il est hors de doute que, pour un fonds de terre exploité de cette façon, le jour viendra où il ne payera plus le travail, en d'autres termes ne nourrira plus l'homme qui le cultive. Cela est le second mode de culture; il aboutit à l'épuisement du sol et se nomme *exploitation épuisante* (raub betrieb), ce qui est évidemment le contraire d'une exploitation rationnelle puisqu'elle amoindrit chaque année la fertilité et la valeur des champs. Tel est le résultat inévitable de cette culture; l'étendue des terres, la diversité de leur richesse en principes nutritifs peuvent seulement faire varier l'époque où il doit s'accomplir.

La méthode d'épuisement peut devenir, bien entendu, une méthode rationnelle si le cultivateur se procure, en remplacement de ses denrées vendues, des engrais propres à rendre à ses terres ce qu'elles ont perdu, et en quantité suffisante pour leur faire recouvrer leur fertilité première.

On peut bien comprendre que, par suite d'un bon choix de plantes, variées successivement de façon à convenir parfaitement au sol, il soit possible d'obtenir de certaines terres un plus grand rendement; que des champs mal cultivés

puissent, par une culture plus soignée, donner de meilleures récoltes ; on comprend aussi que le drainage soit apte à améliorer le sol, c'est-à-dire à le rendre plus fertile ; mais toutes ces améliorations qui témoignent, il est vrai, de l'art et du talent du cultivateur, ne sont pas cependant des preuves d'une culture rationnelle, puisque la somme des conditions qui constituent la fécondité du sol n'est pas augmentée, non plus que la certitude des belles récoltes. On se borne ainsi à rendre plus actives certaines fractions de la somme totale des principes nutritifs que contient le sol. Le véritable caractère d'une culture intelligente, c'est un rendement qui soit chaque année reproduit dans des proportions semblables. L'habileté seule du cultivateur ne suffit donc pas pour maintenir à la longue la fertilité d'un sol auquel on enlève chaque année une partie de ses principes nutritifs sans jamais la lui rendre.

Il y a certaines terres tellement riches en principes nutritifs, que leur effet ne se produit pas sous l'action de certaines circonstances climatériques. On comprend donc que de telles terres, pour donner le même rendement pendant un certain nombre d'années, n'exigent pas la restitution des substances que les récoltes leur ont enlevées, car, par cette restitution, les principes nutritifs restants, déjà trop abondants par eux-mêmes pour pouvoir avoir leur plein effet, le deviendraient plus encore. Les plantes recevraient, par ce fait, un excédant que le sol ne comporterait pas et qui serait nuisible à leur croissance. Pour obtenir de bons résultats sur de telles terres, l'intelligence du cultivateur lui sert mieux que l'engrais, en ce sens du moins qu'il peut discerner les moyens rationnels aptes à corriger la composition physique du sol, et qui sont propres à en éloigner tout ce qui pourrait empêcher l'éclosion et la floraison des plantes.

Le simple drainage suffit quelquefois pour qu'une terre de cette nature arrive à un haut degré de fertilité. En revanche, il faut qu'un engrais bien choisi soit appliqué, en rigoureuse compensation, là où les plus hauts rendements ont été obtenus artificiellement, parce que dans cette circonstance le problème consiste à obtenir continuellement le maximum des rendements. Mais comme l'élévation ou l'abaissement du produit des récoltes s'opère d'une manière fort lente et qu'il manque un signe caractéristique indiquant que le maximum a été obtenu, c'est-à-dire que le moment est venu de compenser ce que le sol a perdu, la raison impose au cultivateur l'obligation d'avoir à sa disposition une quantité suffisante d'engrais pour les champs qui lui ont donné la plus longue suite de brillantes récoltes ; ce n'est que par cette prévoyance qu'il sera sûr de voir les rendements non-seulement se maintenir à la même hauteur, mais encore augmenter très-probablement.

D'après ce qui précède, il est aisé de comprendre que les grands rendements d'un champ ne sont pas la preuve d'une culture rationnelle ; pour qu'une culture mérite d'être appelée ainsi, il faut autre chose, c'est-à-dire des faits appuyés sur la raison et donnant la conviction complète que les grands rendements n'ayant pas été obtenus aux dépens de la richesse du sol, resteraient indéfiniment les mêmes. On peut conclure de même que les faibles rendements d'une terre ne témoignent d'une mauvaise culture que lorsqu'il est prouvé par des arguments rationnels qu'ils sont véritablement le résultat logique de cette mauvaise culture.

A égale culture, un champ pauvre ne donnera jamais d'aussi belles moissons qu'un champ riche ; l'exploitant d'un champ pauvre peut néanmoins être un agriculteur rationnel, alors même que ses moissons sont bien moindres que celles d'un champ riche, mais mal cultivé.

Il est évident, d'ailleurs, que lorsqu'un cultivateur envoie du blé et du bétail au marché de la ville, ce n'est pas une preuve qu'il soit un bon agronome ou un homme riche ; il en résulte non pas que ses terres soient fertiles, mais tout au plus qu'il n'est pas un simple manœuvre ; que son domaine produit plus de fruits qu'il n'en faut pour sa consommation et celle de sa famille, et qu'il a des besoins qu'il ne peut satisfaire qu'en achetant des objets qui lui sont nécessaires. S'il ne pouvait donc payer ces objets avec l'argent rapporté par la vente de ses fruits, il serait obligé de renoncer à sa culture.

Tout ce qui vient d'être dit s'applique à toute espèce de terres, dans n'importe quel pays, même à celui qui exporte du blé et du bétail, car cette exportation n'est pas une preuve qu'il soit riche et fertile ; elle démontre seulement que la population n'est pas proportionnellement aussi forte que sa production, et qu'il a besoin de tirer d'autres contrées certaines marchandises qui lui manquent, en raison de son climat, de la faiblesse de son industrie, ou d'autres diverses causes.

2° LES ENGRAIS.

§ 1er. — Importance et rôle des engrais.

Les objets qu'une nation est impuissante à produire, il faut qu'elle les achète ailleurs ; si le pays ne peut, en échange, exporter ni blé, ni bétail, etc., il faut renoncer à avoir du sucre, du café, du fer, du cuivre et autres marchandises. Si l'étranger cesse d'acheter du blé et du bétail par suite d'améliorations dans son exploitation agricole, ou si la population intérieure augmente, ce qui accroîtra la consommation et diminuera l'exportation, le pays subira cette situation contre son gré ; aussi faudra-t-il pour rétablir l'importation des produits étrangers, coloniaux ou manufacturiers, dont la population manufacturière a besoin, apprendre et appliquer les moyens propres à augmenter proportionnellement les productions de blé et de bétail.

Dans un pays qui ne produit qu'une légère surabondance de blé et de bétail, et qui ne possède pas une industrie largement développée, le rapport de l'exportation ne saurait être conservé que dans le cas où la population cesserait d'augmenter et ne dépasserait pas certaines limites. De tout cela il faut conclure que la marque distinctive d'une bonne ou mauvaise culture, d'une culture rationnelle ou irrationnelle, se découvre dans ce fait : que la majorité des cultivateurs d'un pays est tenue de connaître la loi générale qui préside à la compensation des engrais, et qu'elle doit cultiver ses terres en conséquence, c'est-à-dire qu'elle a besoin de se rendre un compte exact de la quantité des principes nutritifs enlevés par les produits portés au marché, et de ce qu'elle doit lui rendre obligatoirement sous forme d'engrais. Pour remplir cette prescription, il faut vouloir, mais pour vouloir, il faut connaître ; malheureusement, en agriculture, les connaissances agricoles ne viennent que lentement, puisqu'il faut de bien longues années pour les acquérir.

Dans les contrées où les prairies sont constamment irriguées par des cours d'eau chargés de limon, le fumier qu'on obtient, après avoir alimenté les bestiaux du foin qu'on y récolte, est un des engrais les plus puissants pour la fécondité des terres ; mais on n'a qu'à jeter un coup d'œil sur une carte géographique pour reconnaître aussitôt que, que quelque grand que puisse être pour

quelques cultivateurs le profit retiré des prairies, ce profit ne saurait être mis en ligne de compte pour tout un pays. Ce n'est pas toute espèce d'eau qui est propre à l'irrigation des prairies.

Dans un pays parsemé de petites villes, où la propriété foncière est très-morcelée, où la population agricole, très-serrée, n'exporte ni blé ni bétail, et où le citadin s'occupe de la culture des champs ou de l'horticulture, l'équilibre des produits se maintient pendant très-longtemps. Ce que l'habitant de la campagne porte aux petites villes sous forme de blé et de bétail retourne, en grande partie, aux jardins et aux champs des habitants, sous forme d'engrais; l'éloignement entre les villes et villages étant peu considérable, le cultivateur peut acheter du citadin qui ne possède ni champs ni jardins, en échange de légumes et pommes de terre, l'engrais qui lui manque, afin de pouvoir augmenter la fertilité de ses champs. Ce que les terres du pays perdent en totalité, on le regagne aux alentours de la ville, de sorte que, par l'accroissement de la population, il ne se produit qu'une légère non-valeur, qu'il est aisé de couvrir par la vente des produits servant à la transaction, comme le tabac et le vin, et par l'achat de blés et d'engrais venant du dehors. Mais les rapports sont tout autres dans un pays où il existe des grandes villes et où la population agricole apporte de loin du blé et de la viande, ou encore dans un pays qui exporte du blé et du bétail.

Il y a des pays où, dans les grandes villes, toutes les matières accumulées propres à faire de l'engrais sont ramassées sans perte et données aux champs des cultivateurs; là la rotation naturelle existe réellement et la fertilité est permanente. C'est, par exemple, le cas dans la Chine et au Japon, pays où l'agriculture est plus vieille que notre histoire, et où la fertilité des champs n'a pas diminué. L'expérience de l'Amérique du Nord prouve de même qu'une terre à laquelle on enlève constamment, sous forme de blé et de produits divers, sans les lui rendre sous forme d'engrais, les principes nutritifs du sol, est sujette à perdre complétement, dans un temps donné, toute sa fertilité.

Dans la plupart des grandes villes des pays agricoles de l'Europe, on a pris, depuis des siècles, des dispositions de nature à faire sortir des villes les excréments des hommes et des animaux, comme matières nuisibles à la santé; mais on le fait d'une manière qui rend impossible de les recueillir et de les utiliser pour les besoins de l'exploitation agricole. Les essais que l'on a tentés dans différentes villes du continent pour réunir, sous une forme transportable à de grandes distances, les immondices des égouts et des fosses d'aisance n'ont, jusqu'ici, pas réussi à cause des dépenses de l'opération. Quelque minimes que soient les frais, le prix du produit est toujours trop élevé pour que la recette de l'agriculteur puisse couvrir, dans la plupart des cas, les dépenses qu'il a faites, ou du moins ces dépenses ne sont pas en rapport avec le profit. La poudrette de Montfaucon, recueillie dans les immondices des latrines et séchée à l'air, contient, outre une certaine quantité d'eau, 28 0/0 de sable; la poudrette de Dresde, depuis 43 jusqu'à 56 0/0; celle de Francfort-sur-le-Mein, 50 0/0. Cette substance, qu'il faut transporter et qui contient dans un quintal une quantité relativement petite de principes fécondants, est pour ainsi dire sans valeur quelconque pour l'agriculteur.

Dans le voisinage le plus rapproché des villes, les immondices des fosses sont employées avec un grand succès, comme on le sait, par les horticulteurs et les agriculteurs. A Londres, et dans plusieurs autres villes de la Grande-Bretagne, on a commencé à employer avantageusement sur les champs, et notamment sur

les prairies, les liquides des égouts. On retirera toujours de grands avantages de ces sortes de procédés partout où il sera possible de les employer.

Mais, ainsi que j'en ai fait l'observation, la préparation artificielle des éléments actifs provenant des liquides des égouts en augmente le prix de revient à un point tel, que leur débit devient impossible.

Il est, par conséquent, plus rationnel et plus simple de tirer d'autres sources moins coûteuses, les matières qui donnent au contenu des immondices des fosses et aux liquides des égouts une valeur agricole.

J'ai dit plus haut que la culture au fumier d'étable, sur un domaine d'où l'on exporte du grain et du bétail, fait perdre, après un certain temps, leur fertilité et leur valeur aux terres, parce que le cultivateur qui se sert uniquement du fumier d'étable porte chaque année, sous forme de produits ruraux, hors de son exploitation, et sans les remplacer, certains éléments qui constituent la puissance productive et la valeur de ses champs. Chaque année, il vend sous forme de produits la représentation d'une partie de son terrain, et, en continuant ainsi, il est clair que, quelque petite que la perte ait été primitivement, le moment ne manquera pas d'arriver où ses champs ne le nourriront plus. Cette dépréciation des terres, conséquence immédiate de l'exploitation exclusive par le fumier d'étable, a été démontrée par l'expérience dans ces derniers temps, à l'occasion de l'exploitation du domaine de Hohenheim, dans le Wurtemberg, siége d'une école agricole d'une grande renommée.

L'histoire de l'exploitation de Hohenheim, sur laquelle je ne puis m'étendre ici, est très-remarquable. Les directeurs placés à la tête de l'exploitation étaient, jusqu'en 1864, ce qu'on appelait des hommes pratiques, c'est-à-dire que l'exploitation avait été confiée à des agriculteurs sachant exploiter les terres avec profit, en entendant par profit la rente ou l'argent rapporté par la terre, sans avoir égard à l'état dans lequel on la mettait par cette exploitation prétendue lucrative. Un des traits distinctifs de ces hommes pratiques étant de mépriser les doctrines de la science, je veux dire qu'ils considéraient comme superflu d'étudier, dans l'application rationnelle de l'agriculture, les principes nutritifs des plantes, ainsi que les sources d'où ils découlent. Ils ne croyaient pas nécessaire de savoir pourquoi on est forcé de fumer les terres et ce en quoi consiste l'engrais. Les succès momentanés qu'ont de tels hommes, sont souvent très-grands, et provoquent par moments l'admiration de tous les praticiens de même force, qui imitent ou adoptent ordinairement leur méthode; mais au bout de quelques années leur gloire s'éteint, on ne parle plus des riches moissons qu'ils avaient autrefois obtenues, et l'on se tait sur ce que sont devenus ces champs fertiles, qui donnaient de si beaux revenus. A Hohenheim, on avait établi une comptabilité exacte des récoltes, et les rendements successifs obtenus donnaient une image non équivoque de l'état dans lequel se trouvent les terres. D'après les règles qu'on appliquait à l'exploitation de ce domaine, il aurait fallu que les conditions de la fertilité se trouvassent constamment dans le sol, qui se trouverait inépuisable. D'après ces principes, le succès dépendrait uniquement de l'art et de l'habileté de l'homme, et, par conséquent il serait inutile d'employer des engrais tirés du dehors.

Les directeurs de Hohenheim furent fiers d'abord de tirer du terroir des rentes considérables, sans avoir besoin de leur donner une compensation en engrais extérieurs; mais, en peu de temps, il devint visible, et d'une manière effrayante, que leur art tant prisé avait perdu toute sa puissance sur les champs. Aussi longtemps que le sol avait été riche, il s'était montré reconnaissant des

soins qu'on lui donnait; mais dès qu'il devint pauvre, aucune adresse n'y fit plus rien. Les directeurs imaginèrent alors que c'était la nature qui avait changé, et que le climat et le temps, autrefois si favorables, étaient devenus, sans raison, hostiles à leurs efforts. Cependant, comme ils étaient d'avis que le fumier d'étable produisait les recoltes du terroir et qu'il ne manquait que cet ingrédient pour obtenir de plus grands rendements, ils cherchèrent à remédier au mal en produisant une plus grande quantité de fumier d'étable, ce qui leur réussit en effet.

Dans les années de 1832 à 1841, on employa à Hohenheim comme engrais un cinquième de fumier d'étable de moins et on obtint néanmoins sur la même quantité de terres 20 p. 100 de grains en plus que pendant les années de 1854 à 1860. Cette diminution se comprend très-bien; car, par la vente des céréales, les terres de Hohenheim perdirent, de 1821 jusqu'à 1860, 49,000 kilogrammes d'acide phosphorique qui n'étaient pas remplacés. L'absence d'un des éléments les plus essentiels de la production du blé se faisait naturellement sentir par la diminution des moissons. Pour maintenir d'une manière durable les récoltes au même niveau, il aurait fallu donner aux terres de Hohenheim 180,000 kilogrammes de poudre d'os.

L'exploitation de Hohenheim, qui, pendant de longues années, passa pour être un modèle, et, comme tel, était recommandée à l'imitation, a prouvé bien évidemment que, lorsque ses principes nutritifs sont enlevés aux champs sous la forme de produits qu'on y recueille, si l'on n'accorde pas au sol une compensation, la meilleure terre perd peu à peu sa fertilité. Il est clair que ce qui est vrai pour un fonds de terre doit nécessairement être vrai pour l'ensemble des propriétés du pays exploitées dans le même système.

Dans la plupart des pays européens, l'usage est d'exploiter au fumier d'étable, c'est-à-dire au moyen du fumier produit sur place, sans achat supplémentaire d'engrais. Il n'y a donc point de doute que, si on ne remédie au vice de cette méthode, les terres doivent s'appauvrir. Cette diminution de la fertilité s'opère d'une manière assez lente pour qu'elle échappe à peu près à l'observateur ordinaire. Beaucoup de cultivateurs, dont l'exploitation est fondée sur la culture des plantes fourragères et la rotation des cultures, nient souvent d'une manière absolue que cette diminution soit réelle.

L'augmentation des rendements est, en effet, souvent très-grande pendant la première période de l'exploitation, mais ce n'est pas une preuve, ainsi que je l'ai démontré ailleurs, que les champs aient gagné en principes actifs. Ce mode d'exploitation prouve seulement que les principes nutritifs, plus profondément enfouis dans le sol, ne pouvaient pas atteindre les racines des céréales et agir sur elles, mais étaient atteints par les racines bien plus longues des plantes fourragères et se trouvaient ainsi utilisés. Ces plantes fourragères servant à la nourriture des animaux, les principes nutritifs qu'elles contiennent sont, sous forme de fumier, rapportés sur les champs et fournissent à ceux-ci les conditions indispensables à la production des céréales. Mais, comme le sous-sol est pour les plantes fourragères ce que sont les couches supérieures pour les céréales, il perd peu à peu le pouvoir de les nourrir et les champs deviennent impropres à la production de ces plantes. On dit alors que ces champs sont épuisés par la production du trèfle. Dès que ce moment arrive, c'est-à-dire dès que le sous-sol est épuisé, il est naturel que la même culture n'y puisse plus prospérer.

D'autres ont cherché à prouver par des démonstrations statistiques que le

rendement des champs et des domaines n'a pas diminué. Il peut en être ainsi pour beaucoup de cas, mais ce n'est pas encore une preuve que ces champs ne soient pas devenus plus pauvres. Cela prouve tout simplement qu'on y a mis plus d'art, d'adresse et de travail pour obtenir des récoltes aussi considérables que celles qu'on avait dans le passé, alors qu'on dépensait moins d'art et de soins. Quant à ce qui concerne l'équilibre ou la non-diminution de la production des céréales sur certains domaines, il en est comme du domaine de Hohenheim où, nonobstant la diminution des rendements de quelques champs particuliers pendant les années 1854-1860, on avait produit en totalité plus de blé que pendant les années 1832-1841. La raison en était que, pour pouvoir vendre autant de blé qu'autrefois, on avait fini par augmenter d'un cinquième les champs destinés à la production du blé.

Le premier signe de la diminution de la fertilité est que le poids des grains diminue ; en Allemagne, les vieux cultivateurs se rappellent que dans leur jeunesse les grains du blé, de l'orge et des autres céréales avaient plus de pesanteur. Ce sont là des faits excessivement simples pour la science qui les exprime par des chiffres ; si donc elle signale les dangers qui menacent les pays où l'agriculture repose sur l'épuisement des champs, elle n'a fait que remplir son devoir et elle accepte très-volontiers le reproche qu'on lui adresse très-souvent d'avoir exagéré ces dangers ; mais aucun homme sensé n'osera prétendre que le péril n'existe pas, uniquement parce qu'on n'en éprouve pas les effets et parce qu'il n'est pas encore près de nous.

§ II. — Rôle des divers genres d'engrais.

Si l'on demande maintenant quelles matières ont été enlevées aux terres par le blé et le bétail, qui ont été vendus, il est aisé de comprendre que la matière la plus importante de toutes est celle que le sol contient relativement en plus petite quantité que les autres, une fois la moisson faite. Les différents principes nutritifs livrés par ce sol sont les parties incombustibles des plantes que nous obtenons en traitant leurs cendres, savoir : l'acide phosphorique, l'acide sulfurique, l'acide silicique, la potasse, la chaux, la magnésie et le fer ; toutes les plantes fourragères contiennent, en outre, du chlorure de sodium. Quant à l'azote, les plantes le reçoivent en partie de l'atmosphère et en partie du sol, sous forme d'acide nitrique et d'ammoniaque. Tous ces principes ont pour les plantes la même valeur ; s'il en manque un seul dans le sol, l'acide phosphorique, par exemple, l'effet de tous les autres est neutralisé. Aucun d'eux ne peut se remplacer par un autre. Les récoltes sont proportionnelles aux principes nutritifs que le sol contient en minimum. Ces principes sont semblables aux anneaux d'une chaîne dont la force dépend des plus faibles. Si un champ est pauvre d'un seul principe, de l'azote, par exemple, et qu'on en augmente la quantité, la récolte s'accroîtra et, en même temps, les autres principes révéleront une action qui était latente auparavant. Si, dans certains champs, il manque deux principes nutritifs, l'azote et l'acide phosphorique, par exemple, on les fumera vainement avec des engrais riches en azote seulement ; l'azote paraîtra ne pas exercer son effet ; il faut absolument fournir les deux principes au sol, mais alors l'effet est immanquable.

Il vient d'être dit que le cultivateur devait surtout fumer ses terres avec les substances représentant les principes qu'elles contiennent en moindre quantité ; pour les plantes, tous les principes qui concourent à leur développement ont la

même valeur, mais il n'en est pas de même pour le cultivateur. La chaux, par exemple, constitue un des plus puissants principes nutritifs et, par conséquent, un des meilleurs engrais. Mais, dans un terrain calcaire, la quantité existante de chaux est tellement considérable, relativement à la quantité des plantes produites, qu'il est inutile de la fournir ou de la remplacer. Il n'en est pas de même pour un terrain argileux ou sablonneux. Dans ces sortes de terres, la chaux est indispensable pour faire pousser certaines plantes, des trèfles, par exemple, qui sans cela n'y viendraient pas. On peut dire la même chose de la magnésie. Les choses se passent différemment avec l'acide phosphorique. Il existe généralement en très-petite quantité dans le sol, et il forme une partie intégrante dans toutes les plantes, graines, racines et tubercules sans distinction; les substances où il se trouve en plus grandes quantités sont les céréales et les légumineuses, ainsi que le sang, la viande et les os des animaux élevés dans les champs.

Le cultivateur qui exporte des récoltes de son exploitation doit donc toujours être attentif à restituer au sol les principes nutritifs qu'elles contiennent. L'azote, par suite de l'extension prise par les cultures fourragères, étant rendu en partie au sol par l'atmosphère, et, d'autre part, un grand nombre de terrains étant pourvus de potasse, le remplacement de ces deux principes n'est indiqué que dans certains cas spéciaux ; mais un cultivateur qui suit une méthode rationnelle doit toujours racheter ce qui manque en acide phosphorique. La fumure avec des doses exactes d'acide phosphorique est par conséquent le signe auquel on reconnaît le cultivateur qui suit une méthode rationnelle [1]. Si donc, de deux surfaces égales de terre arable, l'une reçoit plus de phosphate que l'autre, c'est un signe que la première est cultivée d'une manière plus rationnelle que la seconde.

Les os des animaux de boucherie sont riches en phosphate et ont acquis une valeur vénale depuis qu'on a constaté leur importance comme engrais, aussi ne s'en perd-il dans chaque pays qu'une très-petite proportion. Dans beaucoup de contrées, les os qu'on y recueille ne suffisent pas aux besoins des cultivateurs; de là viennent les grandes commandes faites à l'étranger en phosphate, en guano et en autres substances analogues riches en azote et en acide phosphorique. Il en

[1] Les moyennes ci-après, résultant de nombreuses analyses, indiquent assez exactement la contenance des divers produits ruraux en azote, en acide phosphorique et en potasse, et par suite, les quantités par 100 kilogrammes que leur culture enlève au sol.

100 kilogrammes des produits ci-après contiennent :

	EN AZOTE.	EN ACID. PHOSPHORIQ.	EN POTASSE.
Froment.	20,8	8,2	5,6
Seigle.	17,6	8,2	5,4
Orge.	15,2	7,2	4,8
Avoine.	19,2	5,5	4,2
Betterave..	1,8	0,8	4,0
Foin.	13,2	4,1	17,1
Bœuf vivant..	2,4	18,6	1,7
Mouton vivant.. . . .	2,0	12,3	1,5
Veau vivant..	2,4	13,8	1,0
Cochon vivant.. . . .	2,0	8,8	1,0

L'hectolitre pèse en moyenne :

Pour le froment.	73 kilogrammes.
Pour le seigle..	70 —
Pour l'orge..	64 —
Pour l'avoine.	44 —

est résulté que, dans beaucoup de pays, il s'est créé une nouvelle branche de commerce, celle des engrais, qui, de jour en jour, prend une extension colossale. Les nombreuses demandes de phosphate ont déterminé les marchands d'engrais à envoyer des géologues dans toutes les parties du monde pour découvrir des gîtes de phosphate, et on en a rencontré en Espagne, au Canada, dans plusieurs îles de l'Atlantique, dans presque toutes les parties du monde, et en quantité considérable sous forme de coprolithes.

Ces derniers sont souvent très-durs, plus que le grès, et ont besoin, par conséquent, d'une certaine préparation pour servir aux mêmes usages que les os. Ces derniers agissent déjà quand ils sont réduits en poudre fine ; mais il est préférable de mélanger la poudre d'os avec un volume égal de sciure de bois ou de terre végétale et une certaine quantité de fumier de vache ou de mouton, court (sans paille), de mettre le tout en tas et de l'arroser d'eau de purin ; il s'y développe alors une fermentation qui dissout la gélatine existant dans la poudre d'os et qui rend plus soluble le phosphate de chaux qui en constitue l'élément principal. Pour produire les mêmes effets que la poudre d'os, les phosphates naturels doivent être dissous à l'aide d'acides, c'est-à-dire liquéfiés pour pouvoir être absorbés par les plantes ; à cet effet, on emploie généralement l'acide sulfurique en quantité suffisante pour se combiner avec les deux tiers de la chaux contenue dans le phosphate naturel. Ces phosphates préparés dans les fabriques de produits chimiques sont connus dans le commerce sous la désignation d'*engrais artificiels* et prennent le nom de *superphosphates*. Dans les meilleures espèces, on retire ainsi 20 p. 100 d'acide phosphorique sous la forme de phosphate soluble plus ou moins mélangé. Souvent on ne constate que 12 p. 100 d'acide phosphorique soluble.

Les engrais qui ne contiennent pas de phosphate sont naturellement sans valeur pour l'agriculture. Indépendamment de l'acide phosphorique, la restitution de l'azote est également d'une grande importance pour le sol. On peut admettre, il est vrai, que la quantité d'azote emportée dans les plantes et dans le bétail soit restituée aux champs sous forme d'ammoniaque par l'atmosphère et par les pluies, de sorte qu'en fait il n'y a pas de déperdition ; mais l'ammoniaque (dans laquelle se résout peu à peu l'azote de toutes les substances azotées qui se trouvent dans le sol et qui y ont été apportées sous forme d'engrais), l'ammoniaque, disons-nous, dans un grand nombre de terrains, passe très-promptement à l'état d'acide nitrique qui, se combinant avec la chaux, forme un sel très-soluble que la pluie fait pénétrer à une profondeur telle, que ce sel ne peut plus être atteint par les racines des plantes. Des expériences faites à ce sujet ont constaté, en effet, que de l'eau pluviale, qui avait filtré pendant six mois à travers une couche de six pouces d'épaisseur aux environs de Munich, ne contenait pas d'ammoniaque, mais une notable quantité de nitrate de chaux. Par cette conversion en acide nitrique, les meilleures terres perdent une quantité d'azote plus grande que celle que leur retire la récolte, et il est très-nécessaire de la leur restituer.

La fumure avec les sels de potasse a acquis une importance particulière dans les contrées où s'est répandue la culture de la betterave pour la fabrication du sucre. La jus de la betterave est riche en sels de potasse qui, lors de la fabrication du sucre, se réunissent dans les mélasses. Dans beaucoup d'endroits on utilise ces mélasses pour la fabrication de la potasse au grand avantage du fabricant, mais au grand préjudice des terres ; il est arrivé que, par suite de la perte de cette substance pour le sol, le rendement en sucre des betteraves cultivées ensuite sur ces terres avait extraordinairement diminué. Le fait a été constaté d'une ma-

nière irréfragable en Allemagne, et on y considère la fumure avec les sels de potasse comme une condition indispensable de la richesse saccharifère des champs plantés en betteraves; grâce à ce mode de fumure, le jus arrive à contenir une plus grande quantité de sucre, et le produit en betterave augmente également.

Pour l'appréciation des prix des diverses sortes d'engrais qu'on trouve dans le commerce et dont la valeur est en raison de leur contenance en azote, en potasse et en acide phosphorique, il est nécessaire de prendre un point de départ certain dans le prix des éléments qui les composent. Admettons, par exemple, que 100 kilogrammes de sulfate de potasse de Stassfurt se vendent 32 francs: ce sel contient de 40 à 42 p. 100 de potasse. Il s'ensuivra que le prix d'un kilogramme de potasse est de 80 centimes.

Le phosphate de chaux, qu'on obtient comme produit accessoire dans la fabrication de la colle forte, coûtant, avec une teneur de 65 p. 100, 20 francs les 100 kilogrammes, revient à 30 centimes le kilogramme; 100 kilogrammes de guano-Baker, contenant 78 p. 100 de phosphate de chaux coûtent 23 fr. 40 centimes. Ces deux espèces de phosphate de chaux se vendent plus cher dans le commerce que les espèces compactes et de nature pierreuse, qu'on ne parvient à dissoudre qu'en les traitant préalablement par l'acide sulfurique. Au prix où se cote le guano-Baker, le phosphate de chaux revient également dans le commerce à 30 centimes le kilogramme ; 78 kilogrammes de phosphate de chaux contenant 35 kilogrammes 8 hectogrammes d'acide phosphorique, le kilogramme d'acide phosphorique, sous forme de phosphate de chaux, revient ainsi à 65 centimes.

Le prix du superphosphate de chaux qui contient 20 p. 100 d'acide phosphorique soluble, étant de 20 francs les 100 kilogrammes, le kilogramme d'acide phosphorique revient à 1 franc. L'engrais le plus riche en azote est le guano du Pérou; après lui, la poudre d'os contient généralement de 3 à 4 p. 100 d'azote. On peut facilement déduire le prix de l'azote de celui du guano, de la poudre d'os et du sulfate d'ammoniaque du commerce. A l'état où ce dernier produit est mis dans le commerce, il contient 20 p. 100 d'azote. Les 100 kilogrammes coûtant 40 francs, le prix du kilogramme d'azote est de 2 francs.

Les prix courants du commerce fourniront par conséquent les données ci-après :

1	kilogramme	de potasse vaut..........	0f,80
1	—	de phosphate de chaux.......	0f,30
1	—	d'acide phosphorique (non soluble). .	0f,65
1	—	d'acide phosphorique (soluble)....	1f,00
1	—	d'azote...............	2f,00

Un cultivateur qui suit une méthode rationnelle d'exploitation ne s'aventurera pas à dépenser de l'argent pour un engrais dont il ne connaît pas la composition ou la richesse en principes actifs, et, à l'occasion, il agira comme tout autre industriel, comme un fabricant de savon, par exemple, qui, lorsqu'il achète de la soude, la paye en raison de sa force alcaline. Quelques exemples suffiront pour faire comprendre au cultivateur la manière dont il doit juger les prix des engrais qui paraissent dans le commerce. S'agit-il, par exemple, de déterminer les prix d'espèces données de guano. Les analyses des deux espèces ont donné :

	PREMIÈRE SORTE.			DEUXIÈME SORTE.	
	kil.	fr.	fr.	kil.	fr.
Azote.	12,00	2,00	24,00	14,00	28,00
Acide phosphorique (soluble).	3,00	1,00	3,00	4,00	4,00
Acide phosphorique (non soluble).	9,00	0,65	5,85	10,00	6,50
Potasse.	0,6	0,80	0,48	0,6	0,48
Prix de 100 kilogrammes.			33,33		38,98

La seconde sorte, à raison de ses éléments, peut donc être payée par le cultivateur 5 fr. 65 cent. plus cher que la première.

PAR 100 KIL. DE POUDRE D'OS.

	PREMIÈRE QUALITÉ.			DEUXIÈME QUALITÉ.	
	kil.	fr.	fr.	kil.	fr.
Azote.	4,00	2,00	8,00	3,5	7,00
Phosphate de chaux.	64,60	0,30	19,20	60,00	18,00
Pour 100 kilogrammes.			27,20		25,00

	100 KIL. DE FUMIER D'ÉTABLE.			100 K. EAU DE FUMIER	
	kil.	fr.	fr.	kil.	fr.
Azote.	0,3	2,00	0,60	0,8	1,60
Acide phosphorique (non soluble).	0,21	0,65	0,136	0,01	0,065
Potasse	0,60	0,80	0,48	0,5	0,400
Prix de 100 kilogrammes.			1,216		2,065

	CHAUX ANIMALISÉE DE MOSSELMAN.		
	kil.	fr.	fr.
Azote.	0,49	2,00	0,98
Acide phosphorique (insoluble).	0,692	0,65	0,45
Potasse.	1,4	0,80	1,12
Prix des 100 kilogrammes.			2,55

Ce serait une erreur de croire que les prix des engrais, déterminés comme il vient d'être dit, répondent toujours à leur valeur pour le cultivateur ; on ne peut admettre ce fait que dans des cas exceptionnels. Au point de vue de l'agriculture, leur valeur dépend de la quantité des produits qu'ils peuvent faire obtenir, et il est aussi facile de comprendre, par exemple, que l'azote contenu dans l'eau de fumier est pour ainsi dire sans valeur agricole pour les champs de céréales. Il y augmentera peut-être le rendement en paille, mais, dans le plus grand nombre

de cas, il sera sans influence sur le rendement en grains, parce qu'il ne contient pas d'acide phosphorique. Par contre, l'eau de fumier additionnée de phosphate aura la même valeur, au point de vue de l'agriculture, que le fumier d'étable. De même, l'azote, s'il est contenu dans le fumier d'étable, a une plus grande valeur pour l'agriculture que lorsqu'il est renfermé dans le guano, parce que le fumier d'étable possède, par la potasse qu'il contient, une condition de fertilité qui manque au guano.

L'addition des phosphates de poudre d'os, par exemple, augmente la valeur agricole des fumiers d'étable et du guano, et ce dernier, par le mélange avec des sels de potasse, peut acquérir de même la valeur agricole des fumiers d'étable. L'expérience démontre que, dans bien des cas, le guano seul suffit pour augmenter les récoltes, mais les produits des champs emportent une quantité importante de potasse que le guano ne remplace pas ; il s'en suit que les terres, fumées continuellement et exclusivement avec du guano, perdent toute leur potasse, et que, arrivée à une certaine limite, l'action productive du guano, si puissante au commencement, s'arrête complétement.

Nécessité d'une production d'engrais artificiels. — Les terres de la France sont cultivées depuis si longtemps, qu'elles ont presque partout perdu les matières fertilisantes que la nature y avait accumulées pendant les siècles primitifs. Il faut aujourd'hui une production énorme d'engrais et on ne peut recourir qu'aux engrais artificiels. C'est ce qu'explique M. Paul Boiteau dans son Rapport sur l'état des engrais à l'Exposition universelle de 1867 :

Nécessité d'une production d'engrais artificiels.

Toutes les plantes, de quelque nature et variété qu'elles soient, ne peuvent croître et fructifier qu'en prenant au sol, pour se les approprier, la plus grande partie des éléments vitaux dont elles ont besoin, de là l'impérieuse nécessité de restituer à la terre sa puissance fécondante si l'on veut, après une récolte qu'on enlève, lui en faire produire une nouvelle.

On a cru longtemps que la jachère qui entrait dans les assolements anciens, avait la vertu de permettre au sol de reprendre, par le repos, sa fécondité épuisée. Cette pratique est presque généralement abandonnée comme une erreur matérielle.

En vertu d'un autre adage, à savoir que la terre se repose en changeant de culture, on a appliqué la théorie des nouveaux assolements, laquelle consiste à faire succéder sans repos, sur un même sol, d'après un ordre déterminé, un certain nombre de plantes ou récoltes de nature différente.

Sans nul doute, le système des assolements possède un incontestable avantage en ce que les plantes ne se nourrissent pas toutes en égale proportion des mêmes principes fécondants de la terre, en ce que les uns trouvent les éléments de leur vitalité dans les couches supérieures du sol, tandis que d'autres vont se nourrir dans les couches inférieures ; mais il n'en reste pas moins démontré que la théorie des assolements le plus judicieusement établie ne restitue pas à la terre les éléments de fertilisation qui lui ont été enlevés par les récoltes qu'elle a portées. Il faut donc toujours en venir à la nécessité de rendre au sol les principes fertilisants qu'il a perdus. Cette restitution s'opère au moyen des engrais.

Les fumiers de ferme, dans ce qu'ils ont de largement utile, ne sont guère en France à la disposition que d'un petit nombre de grands agriculteurs. Les petits

cultivateurs qui, de leurs propres mains, soignent de modestes domaines de deux ou trois hectares d'étendue, ne peuvent avoir de prairies pour élever du bétail et, avec le bétail, se procurer du fumier. Il leur faut donc d'autres engrais. D'ailleurs le fumier de ferme n'est pas excessivement bon pour toutes les récoltes, quoiqu'il n'y ait pas d'engrais qui soit plus généralement efficace, et quoique évidemment le moyen le plus simple de se procurer des engrais ce soit de les créer sur place.

Mais qu'on laisse de côté ces distinctions, et qu'on évite de s'engager dans la discussion du système qui supprime les engrais de ferme et engrais naturellement composés et qui, isolant, suivant les récoltes, les principes de la nourriture habituelle des plantes, ne donne aux unes et aux autres, pour les faire croître, que des éléments chimiques fabriqués dans l'usine; — le fait qui frappe immédiatement l'attention et domine les débats, c'est qu'un grand pays, c'est qu'une vieille terre cultivée, comme l'est le sol de la France ou celui de l'Angleterre, manque actuellement d'une grande partie des engrais qui lui sont nécessaires.

Pour fumer convenablement les champs de la France, il faudrait, par exemple 2 milliards 850 millions de quintaux métriques d'engrais normal; les fumiers d'exploitation ne fournissent guère que 980 millions. Reste à pourvoir à un déficit annuel de 1 930 millions de quintaux. La fabrication ou l'introduction des engrais de tout genre ne dépasse pas 710 millions. Il manque donc environ 1 220 millions de quintaux d'engrais à l'agriculture française. Ces chiffres, de l'avis des personnes compétentes, sont plutôt au-dessous qu'au-dessus de la vérité.

Ainsi, à la suppression des jachères et même à la constitution des assolements répond la nécessité de l'intervention des engrais, c'est-à-dire de la production active des engrais naturels, de la création plus abondante des engrais artificiels et de l'abaissement du prix de tous les engrais.

Il n'y a en France aucune région où l'engrais surabonde, même au nord. Si l'on exporte de là des noirs qui vont en Bretagne, c'est que le sol est assez riche en phosphate pour s'en passer, mais il n'en est pas ainsi des engrais azotés, dont la demande y est très-vive.

Dans les cultures les plus perfectionnées, le prix de l'engrais entre encore pour cinq francs dans le prix de l'hectolitre de blé, pour cinq francs dans celui de la tonne de betteraves, et pour dix centimes dans le prix du kilogramme de viande produite. Il est donc indispensable d'encourager la production des engrais. Si le premier souci de l'agriculteur doit-être de ne rien perdre de ce qui, sur l'étendue entière de sa ferme, peut servir à engraisser le sol (on a été jusqu'à prétendre que la France perd ainsi, chaque année, pour 2 milliards d'engrais, en indiquant le moyen de ne les point perdre), il n'en reste pas moins certain, que l'industrie des engrais est l'une des plus importantes que l'on puisse encourager.

FIN.

Typographie Lahure, 9, rue de Fleurus. à Paris.

MANUEL
DE L'INGÉNIEUR
DES PONTS ET CHAUSSÉES

PARIS. — TYPOGRAPHIE LAHURE
Rue de Fleurus, 9

MANUEL

DE L'INGÉNIEUR

DES PONTS ET CHAUSSÉES

RÉDIGÉ

CONFORMÉMENT AU PROGRAMME

ANNEXÉ AU DÉCRET DU 7 MARS 1868

RÉGLANT L'ADMISSION DES CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES
AU GRADE D'INGÉNIEUR

PAR

A. DEBAUVE
INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

18me FASCICULE

DES EAUX EN AGRICULTURE

PARIS
DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES
49, QUAI DES AUGUSTINS, 49

1876

DES EAUX EN AGRICULTURE

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

DEUXIÈME SECTION

EAUX UTILES

CHAPITRE I.

Irrigations

CHAPITRE II.

Colmatage

PROGRAMME

1. Desséchements. — Différentes causes de la trop grande humidité des terres. — Curage des cours d'eau. — Rigoles d'assainissement; canaux de ceinture.

Desséchement : 1° par l'exhaussement du sol, colmatage; 2° par l'abaissement du plan d'eau général; 3° par l'endiguement des cours d'eau, l'ouverture de fossés latéraux et de rigoles transversales ; 4° à l'aide de machines avec réservoirs inférieurs.

Principaux ouvrages à construire dans ces divers systèmes de desséchements.

2. Drainage. — Principes généraux. — Mode d'exécution des travaux.

3. Irrigations : 1° Par submersion sur les terrains à peu près horizontaux; 2° par déversement sur les terrains en pente ; 3° sur un sol disposé en ados. — Limonages. — Quantités d'eau dans différents cas.

Divers moyens de se procurer les eaux d'irrigation; prises d'eau. — Canaux et rigoles pour la dérivation et la répartition des eaux. — Ouvrages d'art. — Distribution des eaux entre les intéressés ; appareils de jaugeage. — Reprises d'eaux.

DES EAUX EN AGRICULTURE

Dans les considérations générales sur les usages de l'eau, nous avons montré que l'on pouvait diviser les eaux en eaux utiles et eaux nuisibles.

L'étude des eaux utiles comprend les moteurs hydrauliques, les machines à vapeur, les distributions d'eau et les égouts qui en sont le corollaire, les irrigations et colmatages, les rivières, les canaux et les ports de mer.

L'étude des eaux nuisibles comprend l'endiguement des cours d'eau, des étangs et des mers, le curage des rivières, les desséchements superficiels et le drainage ou desséchement souterrain.

Dans ce volume, nous considérerons les eaux au point de vue de l'agriculture.

L'étude des eaux nuisibles à l'agriculture comprend :

Les desséchements superficiels, dont fait partie le curage des cours d'eau ;

Les desséchements souterrains, qui constituent le drainage.

L'étude des eaux utiles à l'agriculture comprend :

Les arrosages ou irrigations ;

Les colmatages, ou arrosages opérés avec des eaux troubles, en vue d'exhausser le sol qui les reçoit.

De cet exposé découle la division rationnelle de l'ouvrage ;

1re section. — Eaux nuisibles.	Chapitre I. — Curage et desséchements. Chapitre II. — Drainage.
2e section. — Eaux utiles. .	Chapitre III. — Irrigations. Chapitre IV. — Colmatages.

PREMIÈRE SECTION

EAUX NUISIBLES

CHAPITRE PREMIER

CURAGE ET DESSÉCHEMENTS

Considérations générales. — On appelle marais ou marécages les parties du sol recouvertes par des eaux stagnantes, dont la profondeur est généralement minime; il se développe dans ces eaux une végétation particulière, et souvent elles sont peuplées de nombreux animaux d'ordre inférieur. — Pendant la saison humide, le niveau de l'eau s'élève, et, grâce à l'abaissement de la température, la fermentation animale et végétale est peu active, les marais ne sont pas dangereux. — Quand arrive la saison chaude, le niveau de l'eau s'abaisse; d'immenses surfaces vaseuses sont mises à découvert; la chaleur et l'humidité combinées développent dans la masse entière une fermentation putride; l'air se charge de miasmes, et les populations sont décimées par les fièvres, qui sévissent surtout dans les pays situés sous le vent régnant.

Non seulement les marais constituent un danger pour la salubrité publique, mais encore ils font perdre à l'agriculture une immense surface que l'on peut évaluer pour la France entière à environ 600 000 hectares, et cette perte est d'autant plus regrettable qu'il s'agit en général de terrains susceptibles d'une grande fertilité.

C'est un des titres de gloire d'Henri IV d'avoir songé le premier à dessécher les marais dangereux et improductifs.

A côté des marais, il faut placer les étangs et les lacs, qui en diffèrent en ce sens qu'ils contiennent une certaine hauteur d'eau, comparable à celle qu'on trouve dans les rivières et même dans l'Océan. Les étangs se rencontrent dans des dépressions naturelles qu'ont produites les dislocations de l'écorce terrestre.

Quand ces dépressions existent dans les vallées parcourues par un fleuve, elles emmagasinent les eaux de ce fleuve et lui servent de régulateur. Considérons, par exemple, le Léman : le Rhône qui descend des glaciers des Alpes, y pénètre à Villeneuve, le parcourt dans toute sa longueur, et en sort à Genève. Les eaux

du lac sans cesse renouvelées restent pures et limpides, elles ne constituent pas un danger pour la santé publique; le lac rend même un grand service en emmagasinant à certaines époques les eaux surabondantes du Rhône supérieur.

Sous de moindres proportions, beaucoup de lacs et d'étangs sont dans le même cas. Il ne faut pas chercher à les dessécher, car ils jouent un rôle éminemment utile, et sont du reste susceptibles, grâce à la pisciculture, d'apporter à l'alimentation un contingent précieux.

Quant aux étangs qui se rencontrent dans des cuvettes fermées de toutes parts, ils présentent à peu près les mêmes inconvénients que les marais, et ne se prêtent pas toujours à la pisciculture; alimentés par le ruissellement des eaux pluviales sur les versants qui les entourent, ils voient leur niveau s'élever pendant la saison humide, puis s'abaisser pendant la saison chaude. Les plages mises à nu sont le siége d'une active fermentation, et les eaux non renouvelées ne tardent pas à se corrompre. Les lacs et les étangs sont dus à une cause géologique; les marais au contraire proviennent souvent du fait de l'homme.

Les marais résultent de diverses causes :

1° Lorsqu'un cours d'eau est abandonné à lui-même dans une vallée à faible pente, son lit s'exhausse peu à peu, en certains points s'établissent des relèvements du fond ou des obstacles formant barrages, les eaux sont gonflées et passent sur les berges pour se répandre de chaque côté du lit. Les matières en suspension se déposent d'abord dans le voisinage des berges, de sorte que celles-ci s'élèvent plus vite que les terres latérales; les eaux, qui recouvrent ces terres pendant l'hiver, se trouvent donc emprisonnées lorsque le débit du cours d'eau diminue, c'est-à-dire pendant l'été. Un marécage prend naissance; il s'accroît chaque année, et bientôt la vallée entière est envahie, les eaux ont perdu leur cours régulier; celles qui sont en excès lors des crues finissent par se créer un passage tortueux pour gagner la vallée principale. Dans ce cas, un curage du cours d'eau, accompagné, si cela est nécessaire, d'un approfondissement et du redressement des parties défectueuses, atténue le mal; si l'on ouvre en outre dans les terres latérales des fossés d'égouttement, dont la pente est ménagée de manière à amener les eaux jusqu'au thalweg, on ne tarde pas à transformer le marécage en terre fertile.

2° Il existe des plateaux légèrement ondulés, à pentes indécises, formés d'un sol peu ou point perméable; les eaux pluviales séjournent à la surface, elles se réunissent en flaques et en mares, elles noyent le terrain et le rendent impropre à toute culture. On arrivera souvent avec quelques canaux, ou même avec quelques fossés judicieusement établis, à donner un écoulement à l'eau surabondante et à assainir de grandes surfaces.

3° Sur les bords de la mer, des plages ou des plaines basses d'une grande étendue se trouvent au-dessus du niveau des hautes mers ordinaires, mais au-dessous du niveau qu'atteignent les grandes marées d'équinoxe; elles sont donc envahies par les eaux, lors de ces grandes marées, et les eaux sont retenues par les bas-fonds qu'elles transforment en marécages. L'exécution de digues pourra dans ce cas préserver les plaines attaquées et les rendre à la culture.

4° Certains cours d'eau torrentiels ont un assez faible débit moyen et prennent accidentellement un débit énorme; leur lit est impuissant à les contenir, ils se répandent dans toute leur vallée et la submergent. Quelquefois, la submersion se produit en hiver et dépose un limon fertile; alors, elle est bienfaisante, et il ne faut pas la combattre. Lorsqu'au contraire les submersions se produisent pendant l'époque de la végétation, qu'elles ravinent et bouleversent les terres

au lieu de les améliorer, il faut les combattre. On y arrive en endiguant le cours d'eau, c'est-à-dire en lui créant un lit artificiel capable de livrer passage aux plus grandes crues.

La question des endiguements tient de trop près à la question du régime des fleuves, pour que nous la traitions en ce volume; elle sera beaucoup mieux placée dans l'étude des rivières et canaux.

Dans le cas où l'on endigue un cours d'eau, on peut ménager dans ces digues des déversoirs ou des vannages, qui livrent passage à une partie des eaux limoneuses et les répandent sur les terres situées en arrière des digues. Les eaux troubles s'épanchent sur une grande surface, y perdent leur vitesse, et par suite déposent les matières qu'elles tiennent en suspension; lorsqu'elles sont clarifiées, on les rend au fleuve à l'aval, au moyen de canaux dont la pente est convenablement ménagée. Les dépôts relèvent peu à peu le sol qui les reçoit, jusqu'à ce que le sol ait atteint le niveau des déversoirs et des digues.

Ce mode de desséchement s'appelle le colmatage; c'est une irrigation d'une espèce particulière; aussi ne l'étudierons-nous que dans la deuxième section de ce traité, réservée aux eaux utiles.

5° Lorsque des fleuves débouchent dans une mer à fortes marées, leur écoulement se fait sans peine à basse mer, mais quand la mer monte et reflue dans les estuaires, elle détermine un remous des eaux du fleuve qui s'épanchent sur les terres voisines et les transforment en marécages. C'est par un système de digues convenablement combiné qu'on arrivera dans ce cas à conjurer le mal.

6° Enfin, lorsqu'on se propose de dessécher des étangs ou des marais établis dans des cuvettes que dominent tous les terrains environnants, il n'y a plus qu'à recourir aux moyens mécaniques, afin d'élever les eaux à une hauteur telle qu'elles puissent trouver un écoulement.

En somme, les divers procédés de desséchement sont les suivants :

1° Desséchement par exhaussement du sol au moyen de l'apport des eaux troubles, c'est le colmatage ou irrigation limoneuse, que nous traiterons au chapitre IV.

2° Desséchement par abaissement du plan d'eau général; il s'effectue par le curage des cours d'eau et par l'ouverture de canaux, de fossés et de rigoles.

3° Desséchement par endiguement des cours d'eau; nous avons dit que cette question était réservée et trouverait sa place dans le *Traité des Rivières*.

4° Desséchement par machines élévatoires.

Le curage des cours d'eau navigables est à la charge de l'État; il s'effectue au moyen de dragues puissantes, dont nous avons décrit les divers systèmes dans notre *Traité de l'Exécution des Travaux*.

CURAGE DES COURS D'EAU.

Le curage des cours d'eau non navigables est à la charge des propriétaires intéressés : si l'on considère qu'il existe en France 180000 kilomètres de rivières non navigables, on reconnaît toute l'importance de la question.

Exécution du curage. — L'opération du curage s'effectue généralement par les procédés les plus simples. Lorsqu'il existe sur le cours d'eau des van-

nages de retenue pour les usines ou les irrigations, on lève ces vannages, pendant les jours de chômage, de manière à abaisser le plus possible le niveau de l'eau; les ouvriers s'établissent dans le lit de la rivière, où il ne reste qu'une faible hauteur d'eau, et jettent directement sur les berges les matières provenant du curage.

Lorsque l'on ne peut abaisser suffisamment le plan d'eau pour permettre aux ouvriers de s'établir dans le lit de la rivière, ou lorsqu'on veut éviter le chômage des usines, le curage s'effectue de la rive au moyen des dragues à main que nous avons décrites à la page 25 du *Traité de l'Exécution des Travaux*. La drague à main est une sorte de grande pelle avec rebords latéraux, avec laquelle on peut enlever les vases fluides : cet appareil est percé de trous, qui livrent passage à l'eau en excès, et évitent ainsi à l'ouvrier un travail inutile. La drague à main est munie d'un manche assez long pour permettre d'atteindre de la rive au moins le milieu de la rivière (fig. 1, pl. I).

La manœuvre de la drague à main doit être surveillée, car elle donne souvent de mauvaise besogne. Les ouvriers, étant payés au mètre cube de matière extraite, s'attachent nécessairement à la partie facile du travail en négligeant la partie difficile. Il arrive fréquemment qu'ils creusent trop le lit près des berges et ne le creusent pas assez au milieu du courant, de sorte que la section transversale du fond fait un dos d'âne, le courant de l'eau se porte sur les berges, les affouille, et détermine quelquefois des éboulements.

La drague à main est complétée par une houe à long manche B et par une griffe ou crochet C, qui servent à ramasser la vase compacte et même les pierres; à ces outils, on ajoute le croissant D et le coutre E, qui servent à couper les racines et les branches le long des berges et sous l'eau (fig. 1).

On comprend combien ces procédés primitifs, qui conviennent aux ruisseaux et aux rivières bien entretenues, deviennent coûteux, lorsqu'il s'agit d'exécuter un curage important. Aussi, pensons-nous qu'en bien des cas, on devrait recourir à de petites dragues à bras, du genre de celle que nous avons décrite à la page 31 *de l'Exécution des Travaux*, et qui est en usage pour le curage des biefs de grandes usines situées sur la rivière de l'Essonne, près de Corbeil (Seine-et-Oise). Cette drague se compose d'une chaîne à godets manœuvrée par un treuil à deux hommes et supportée entre deux batelets; dans l'intervalle plonge la chaîne à godets et son élinde, que l'on peut incliner plus ou moins au moyen d'une chaîne s'enroulant autour d'un treuil installé sur un des batelets. Le treuil moteur porte sur son arbre un volant en bois. Cette machine a coûté 1800 francs; dans un terrain moyennement résistant, elle donnera 50 mètres cubes de débit par jour; dans un terrain bien meuble, on peut arriver à 70 mètres. L'usage de cette drague conduira donc à des résultats économiques, et elle est susceptible de recevoir de nombreuses applications; les matières enlevées par les godets se déversent dans un couloir incliné en bois ou en tôle, qui les conduit jusque sur les berges, où elles se trouvent déposées automatiquement. Lorsque les berges seront trop élevées pour permettre l'usage d'un couloir, on recueillera les vases dans un bateau qu'on ira décharger aux endroits favorables.

Parmi les procédés de curage, citons encore le système des chasses, qui rend de grands services dans les ports de mer, mais qui n'est pas souvent applicable aux rivières. Avec des rabots on accumule la vase en amont d'un vannage de retenue qu'on lève tout d'un coup; il se forme un courant rapide qui entraîne la vase, et même approfondit le chenal de la rivière à l'aval. Il est vrai que

peu à peu la vitesse s'atténue, et que les matières en suspension retombent, de sorte que le mal n'est que déplacé. Aussi ce système n'est-il applicable que si l'on peut jeter le produit des chasses soit dans un cours d'eau considérable, soit sur des prairies qui retiennent la vase et en profitent.

En ce qui touche l'époque où l'on doit opérer les curages, on peut dire d'une manière générale qu'il faut les entreprendre à l'époque où les cours d'eau ont le moindre débit et où l'on a le moins de chance de voir fermenter les vases extraites et déposées sur les berges. C'est donc l'automne, c'est-à-dire l'époque qui s'étend du 15 septembre au 1er novembre, qui convient le mieux pour cette opération. Par suite des chaleurs de l'été, les sources sont au plus bas et la profondeur d'eau est minime : en outre, il n'y a plus de grosses chaleurs à redouter, l'hiver arrive, et le dégagement des miasmes n'est pas à craindre.

S'il s'agit de curages sans importance, tels que ceux que nécessite l'entretien des cours d'eau en bon état, l'époque de l'opération est pour ainsi dire indifférente; cependant, si la végétation est active et que les moissons ou les fourrages soient encore debout, on peut se trouver embarrassé pour le dépôt des matières extraites.

Faucardement. — Le faucardement est l'opération qui consiste à faucher sous l'eau les herbes aquatiques dont le développement sur certaines rivières est souvent considérable. On sait combien les herbes des berges et du fond nuisent à l'écoulement des eaux; celles des berges sont faciles à faucher par la méthode ordinaire, celles du fond s'enlèvent plus difficilement. Cependant il est bon sur la plupart des rivières de les couper au moins deux fois par an; certaines rivières exigent même un faucardement mensuel, sauf à réserver quelques touffes d'herbes dans l'intérêt de la pisciculture.

Cette opération est rendue facile au moyen de l'outil connu sous le nom de faucard et décrit par M. l'inspecteur général Tarbé dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1852.

Lorsque la nature du sol et celle des eaux alimentaires, dit M. Tarbé, se réunissent pour favoriser la végétation, les herbes aquatiques acquièrent un développement extraordinaire dans certains canaux, et, depuis le mois de mai jusqu'à l'époque habituelle des chômages, elles doivent être coupées plusieurs fois sous peine d'intercepter complétement la navigation.

Sous une profondeur d'eau de $1^{m},60$, la plus grande partie des herbes échappe à l'action des faux ordinaires et l'opération est longue et pénible.

Il n'en est pas de même avec le faucard dont voici les détails de construction.

C'est une chaîne composée de 12 lames de faux réunies au moyen de boulons à clavettes; la longueur développée de 9 mètres se réduit pendant le fontionnement à cause de la courbure à une longueur de 7 à 8 mètres.

On se sert de veilles lames de faux dont on casse les pointes et les talons. Toutes les lames sont mobiles séparément autour des boulons qui les retiennent et il faut démonter de temps en temps l'appareil pour rebattre les faux.

Pour forcer le faucard à rester à plat, on lui attache trois chaînes de $1^{m},50$ de longueur qui traînent derrière lui sur le fond du cours d'eau et qu'on peut à la rigueur terminer par des pierres.

A chaque extrémité du faucard est attachée une corde qu'un ou deux hommes tirent sur chaque rive en lui imprimant un mouvement saccadé et en remontant le courant, c'est-à-dire en prenant les plantes en sens inverse de leur in-

clinaison.—Les herbes détachées montent à la surface à mesure que l'appareil avance.

Les herbes flottent à la surface, elles sont arrêtées par les grilles qu'on place en avant des coursiers des usines pour empêcher les corps flottants d'arriver jusque sur les moteurs hydrauliques; c'est là qu'on les recueille.

L'appareil que nous venons de décrire a coûté 92 francs; il réalise sur la méthode ordinaire au moins 90 p. 100 d'économie.

Produits du curage considérés comme engrais. — La vase provenant des curages est presque toujours un riche engrais, qu'il ne faut pas laisser perdre. Mais ce n'est pas le seul produit fertilisant que fournit le curage des cours d'eau: le faucardement des plantes aquatiques met également à la disposition des riverains un produit d'une grande valeur agricole.

Nous trouvons, dans la *Chronique* des *Annales des ponts et chaussées* de mai et juin 1860, de nombreuses analyses de vases. Nous ne donnerons ici que la teneur en azote pour cent parties :

Vase de la Bonde (Eure)	0,23	Vase de la Juine au-dessous d'Étampes	0,32
— de la Vesles à Champigny	0,66	— de la Seine prise à la Meilleraye	0,25
— des cuvettes d'épuration des égouts de Reims	1,73	— Caudebec	0,26
— de la Vesles à 10 kilom. au-dessous de Reims	0,54	— Vieux-Port	0,27
— du canal de l'Ourcq	0,29	— Quillebœuf	0,25
— du port de la Rochelle	0,16	— Tancarville	0,25
— du bassin d'Arcachon	0,12	— Laroque	0,15
— de la Juine au-dessus d'Étampes	0,53	— Berville	0,25
		— Honfleur	0,25

Sur les bords de certains étangs du Midi, dit la *Chronique* des *Annales* que nous venons de citer, on coupe, pour en faire du fumier, et l'on vend à un prix assez élevé les roseaux qui y croissent en abondance. Il serait certainement avantageux, dans certaines conditions, de favoriser le développement de plantes aquatiques dans les eaux courantes ou stagnantes, et de se procurer ainsi un engrais supplémentaire, d'autant plus précieux qu'il n'apporte avec lui aucune graine de mauvaises herbes.

Quand on saura mieux les utiliser, les plantes aquatiques seront appelées à rendre, dans l'intérieur des terres, des services analogues à ceux que les cultivateurs du littoral retirent de l'emploi des végétaux marins.

Considérés à ce point de vue, les végétaux aquatiques offrent, en effet, des moyens puissants et économiques de fixer et d'extraire des matières fertilisantes qui s'écoulent en pure perte avec les eaux que l'agriculture n'emploie pas en irrigations.

Les plantes aquatiques exposées à l'air et au soleil perdent assez rapidement de 70 à 92 0/0 de leurs poids d'eau. Ainsi desséchées, elles renferment encore de 13 à 3 0/0 d'humidité qu'elles n'abandonnent qu'à l'étuve. D'après les analyses, ces végétaux simplement séchées à l'air contiennent de 1 à 3 0/0 d'azote et certains renferment 1 pour 100 d'acide phosphorique. Incomplétement desséchés, quand on les emploie comme engrais, on voit qu'ils sont au moins et souvent plus riches en azote que le fumier de ferme normal dosant 0,5 0/0 d'azote.

Il était donc important d'appeler l'attention sur ces produits si longtemps négligés.

Sommaire des lois et règlements sur le curage. — La législation du curage sera traitée à fond lorsque nous nous occuperons du droit administratif. Notre seul but est de compléter ici les notions théoriques par un examen sommaire des lois et règlements administratifs sur la matière.

La première loi relative au curage est celle que l'Assemblée nationale a votée le 12 août 1790 et que le roi a proclamée le 20 août; on l'appelle la loi en forme d'instruction des 12-20 août 1790. En voici l'extrait qui est relatif au curage :

« Les assemblées administratives du département doivent aussi rechercher et indiquer le moyen de procurer le libre cours des eaux ; d'empêcher que les prairies ne soient inondées par la trop grande élévation des écluses, des moulins, et par les autres ouvrages d'art établis sur les rivières; de diriger enfin, autant qu'il sera possible, toutes les eaux de leur territoire vers un but d'utilité générale, d'après les principes de l'irrigation. »

Mais la loi fondamentale du curage est celle du 14 floréal an XI.

LOI DU 14 FLORÉAL AN XI.

Article 1er.

Il sera pourvu au curage des canaux et rivières non navigables et à l'entretien des digues et ouvrages d'art qui y correspondent, de la manière prescrite par les anciens règlements, ou d'après les usages locaux.

Art. 2.

Lorsque l'application des règlements ou du mode consacré par l'usage éprouvera des difficultés, ou lorsque des changements survenus exigeront des dispositions nouvelles, il y sera pourvu, par le Gouvernement, dans un règlement d'administration publique rendu sur la proposition du Préfet du département, de manière que la contribution de chaque imposé soit toujours relative au degré d'intérêt qu'il aura aux travaux qui devront s'effectuer.

Art. 3.

Les rôles de répartition des sommes nécessaires au payement des travaux d'entretien, de réparation ou de reconstruction, seront dressés, sous la surveillance du Préfet, rendus exécutoires par lui, et le recouvrement s'en opérera de la même manière que celui des contributions publiques.

Art. 4.

Toutes les contestations relatives au recouvrement de ces rôles, aux réclamations des individus imposés et à la confection des travaux, seront portées devant le Conseil de Préfecture, sauf recours au Conseil d'État.

Les décrets du 25 mars 1852 et du 13 avril 1861 sur la décentralisation administrative ont consacré les pouvoirs des préfets en ce qui touche les curages ordinaires, et leur donne le droit de statuer sur :

« Les dispositions pour assurer le curage et le bon entretien des cours d'eau non navigables ni flottables, de la manière prescrite par les anciens règlements, ou d'après les usages locaux ; la réunion, s'il y a lieu, des propriétaires intéressés en associations syndicales. »

LOI DU 21 JUIN 1865.

La loi du 21 juin 1865 sur les associations syndicales renferme les dispositions suivantes relatives au curage :

Article 1er.

Peuvent être l'objet d'une association syndicale entre propriétaires intéressés, l'exécution et l'entretien de travaux :

2° De curage, approfondissement, redressement et régularisation des canaux et cours d'eau non navigables ni flottables.

Art. 9.

Les propriétaires intéressés à l'exécution des travaux spécifiés dans les numéros... 2... de l'article 1er, peuvent être réunis, par arrêté préfectoral, en association syndicale autorisée, soit sur la demande d'un ou de plusieurs d'entre eux, soit sur l'initiative du Préfet.

Art. 10.

Le Préfet soumet à une enquête administrative dont les formes seront déterminées par un règlement d'Administration publique, les plans, avant-projets et devis des travaux, ainsi que le projet d'Asssociation. Le plan indique le périmètre des terrains intéressés et est accompagné de l'état des propriétaires de chaque parcelle. Le projet d'Association spécifie le but de l'entreprise et détermine les voies et moyens nécessaires pour subvenir à la dépense [1].

Art. 11.

Après l'enquête, les propriétaires qui sont présumés devoir profiter des travaux sont convoqués en Assemblée générale par le Préfet, qui en nomme le président, sans être tenu de le choisir parmi les Membres de l'Assemblée.

Un procès-verbal constate la présence des intéressés et le résultat de la délibération. Il est signé par les Membres présents et mentionne l'adhésion de ceux qui ne savent pas signer.

L'acte contenant le consentement par écrit de ceux qui l'ont envoyé en cette forme est mentionné dans ce procès-verbal et y reste annexé.

Le procès-verbal est transmis au Préfet.

Art. 12.

Si la majorité des intéressés, représentant au moins les deux tiers de la superficie des terrains, ou les deux tiers des intéressés, représentant plus de la moitié de la superficie, ont donné leur adhésion, le Préfet autorise, s'il y a lieu, l'Association.

[1] Le règlement d'administration publique a été rendu par décret du 17 novembre 1865.

Un extrait de l'acte d'Association et l'arrêté du Préfet, en cas d'autorisation, et, en cas de refus, l'arrêté du Préfet, sont affichés dans les communes de la situation des lieux et insérés dans le Recueil des actes de la préfecture.

ART. 13.

Les propriétaires intéressés et les tiers peuvent déférer cet arrêté au Ministre des travaux publics, dans le délai d'un mois à partir de l'affiche.

Le recours est déposé à la préfecture et transmis, avec le dossier, au Ministre, dans le délai de quinze jours.

Il est statué par un décret rendu en Conseil d'État.

ART. 15.

Les taxes ou cotisations sont recouvrées sur des rôles dressés par le syndicat de l'Administration de l'Association, approuvés, s'il y a lieu, et rendus exécutoires par le Préfet.

Le recouvrement est fait comme en matière de contributions directes.

ART. 16.

Les contestations relatives à la fixation du périmètre des terrains compris dans l'Association, à la division des terrains en différentes classes, au classement des propriétés en raison de leur intérêt aux travaux, sont jugées par le Conseil de Préfecture, sauf recours au Conseil d'État.

Il est procédé à l'apurement des comptes de l'Association selon les règles établies pour les comptes des receveurs municipaux.

ART. 17.

Nul propriétaire compris dans l'association ne pourra, dans un délai de quatre mois à partir de la notification du premier rôle des taxes, contester sa qualité d'associé ou la validité de l'association.

ART. 18.

Dans le cas où l'exécution des travaux entrepris par une Association syndicale autorisée exige l'expropriation de terrains, il y est procédé conformément aux dispositions de l'article 16 de la loi du 21 mai 1836, après déclaration d'utilité publique par décret rendu en Conseil d'État.

ART. 19.

Lorsqu'il y a lieu à l'établissement de servitudes conformément aux lois, au profit d'Associations syndicales, les contestations sont jugées suivant les dispositions de l'article 5 de la loi du 10 juin 1854.

TITRE IV.

De la représentation de la propriété dans les Assemblées générales. — Des Syndics.

ART. 20.

L'acte constitutif de chaque association fixe le minimum d'intérêt qui donne droit à chaque propriétaire de faire partie de l'Assemblée générale.

Les propriétaires de parcelles inférieures au minimum fixé peuvent se réunir pour se

faire représenter à l'Assemblée générale par un ou plusieurs d'entre eux, en nombre égal au nombre de fois que le minimum d'intérêt se trouve compris dans leurs parcelles réunies.

L'acte d'association détermine le maximum de voix attribuées à un même propriétaire, ainsi que le nombre de voix attachées à chaque usine, d'après son importance, et le maximum de voix attribuées aux usiniers réunis.

ART. 21.

Le nombre des syndics, leur répartition, s'il y a lieu, en diverses catégories d'intéressés, et la durée de leurs fonctions, seront déterminés par l'acte constitutif de l'association.

ART. 22.

Les syndics sont élus par l'Assemblée générale, parmi les intéressés.

Lorsque les syndics doivent être pris dans diverses catégories, la liste d'éligibilité est divisée en sections correspondant à ces diverses catégories.

Les syndics seront nommés par le Préfet, dans le cas où l'Assemblée générale, après deux convocations, ne se serait pas réunie ou n'aurait pas procédé à l'élection des syndics.

ART. 23.

Dans le cas où, sur la demande du syndicat, il est accordé une subvention par l'État, par le département ou par une commune, cette subvention donne droit à la nomination, par le Préfet, d'un nombre de syndics proportionné à la part que la subvention représente dans l'ensemble de l'entreprise.

ART. 24.

Les syndics élisent l'un d'eux pour remplir les fonctions de directeur, et, s'il y a lieu, un adjoint qui remplace le directeur en cas d'absence ou d'empêchement.

TITRE V.

Dispositions générales.

ART. 25.

A défaut, par une Association, d'entreprendre les travaux en vue desquels elle a été autorisée, le Préfet rapportera, s'il y a lieu, et après mise en demeure, l'arrêté d'autorisation.

Il sera statué, par un décret rendu en Conseil d'Etat, si l'autorisation a été accordée en cette forme.

Dans le cas où l'interruption ou le défaut d'entretien des travaux entrepris par une Association pourrait avoir des conséquences nuisibles à l'intérêt public, le Préfet, après mise en demeure, pourra faire procéder d'office à l'exécution des travaux nécessaires pour obvier à ces conséquences.

ART. 26.

La loi du 16 septembre 1807 et celle du 14 floréal an XI continueront à recevoir leur exécution, à défaut de formation d'associations libres et autorisées, lorsqu'il s'agira de travaux spécifiés au numéro 2 de l'article 1er de la présente loi.

C'est donc, en somme, l'administration préfectorale qui est compétente pour ordonner les curages, pourvu que ces curages soient exécutés conformément

aux anciens règlements ou usages locaux, et pourvu que les curages se réduisent à l'enlèvement des dépôts, des vases et des racines, de manière à donner au cours d'eau son vieux fond et ses vieux bords.

Le préfet n'est pas compétent pour ordonner un approfondissement ou un élargissement du lit ou un redressement. Le législateur a considéré que des travaux de ce genre ne constituaient plus une servitude, mais une véritable atteinte à la propriété, et qu'ils ne pouvaient être autorisés qu'après la déclaration d'utilité publique rendue par décret, délibéré en conseil d'État.

En fait d'alignements le longs des cours d'eau, les préfets ne sont pas compétents pour en délivrer; ils peuvent seulement constater, après enquête, la largeur naturelle des cours d'eau et déterminer ainsi les lignes séparatives de la rivière et des propriétés voisines, lignes en dehors desquelles les riverains sont libres d'établir telles constructions qu'ils veulent.

La loi des 12-20 août 1790 n'intervient qu'exceptionnellement dans les questions de curage, et les préfets ne peuvent ordonner un curage, par application de cette loi, que dans le cas où les entraves apportées au libre cours de l'eau pourraient amener des inondations ou produire des effets dangereux au point de vue de l'hygiène et de la salubrité publique. —.Les arrêtés préfectoraux n'ont dans ce cas qu'une autorité temporaire et appropriée aux circonstances; ils ne peuvent renfermer de prescriptions permanentes.

Au contraire, les préfets peuvent procéder par voie d'arrêtés permanents lorsqu'ils appliquent la loi du 14 floréal an XI et qu'ils ne dérogent pas aux anciens règlements ou usages locaux.

Toutes les fois qu'il y a lieu à dérogation, un règlement d'administration publique, c'est-à-dire un décret délibéré en conseil d'État, doit intervenir.

Les préfets peuvent déléguer aux maires leur droit de statuer en matière de curage; mais tout arrêté de curage pris par un maire est illégal s'il n'est revêtu de l'approbation préfectorale.

Les infractions aux règlements de curage tombent sous l'application de l'article 471, paragraphe 15, du Code pénal, et sont jugées par les tribunaux de simple police, à moins qu'il ne s'agisse de contestations relatives à l'exécution des travaux et à la confection des rôles, auquel cas la compétence est réservée aux conseils de préfecture.

Les infractions aux règlements de curage sont constatées par les préfets et par les agents sous leurs ordres : maires, commissaires de police, gardes champêtres.

Une commission, instituée au ministère des travaux publics à la suite de la promulgation de la loi de 1865 sur les associations syndicales, a arrêté, pour le curage des cours d'eau non navigables ni flottables, un modèle que M. de Passy a reproduit dans son *Étude sur le service hydraulique.*

DESSÉCHEMENTS PAR ABAISSEMENT DU PLAN D'EAU.

Les desséchements par abaissement du plan d'eau sont les plus simples et les plus économiques. Quelquefois un simple curage suffit à les obtenir; mais le plus souvent le curage des cours d'eau naturels est insuffisant et doit être complété par l'ouverture de nombreux canaux et fossés tracés sur la surface à assai-

nir ; on est presque toujours forcé de recourir soit à des fossés latéraux destinés à assécher les bas-fonds qui se rencontrent au delà des berges du cours d'eau naturel, soit à des canaux de ceinture entourant les terrains humides et ayant pour but de les soustraire aux eaux des versants voisins.

Ces divers systèmes de desséchements se comprendront mieux par les exemples variés qui vont suivre.

RIGOLES D'ASSAINISSEMENT.

Parmi les terres labourables, il en est peu dont la perméabilité soit assez grande pour qu'elles s'assèchent d'elles-mêmes avec rapidité. Cela n'arrive guère que dans le sable pur, c'est-à-dire dans les sols impropres à la culture ordinaire. En général, les terres demandent à être assainies et délivrées des eaux en excès au moyen de raies ou de rigoles.

Tel était le but de l'ancienne culture par billons, que l'on conserve encore dans certaines parties de la France, mais qui tend à disparaître grâce au progrès des pratiques agricoles : elle a l'inconvénient d'être fort gênante pour l'emploi des outils perfectionnés et de faire perdre une partie de la surface productive. La végétation se fait dans de bonnes conditions dans les parties hautes des billons, mais l'excès d'humidité lui est très-nuisible dans les raies.

La culture par planches bombées est donc bien préférable ; grâce aux labours profonds, dont l'usage se propage, les eaux ruisselant à la surface diminuent de volume ; s'il en existe, elles se rendent dans le creux du petit vallon qui sépare deux planches voisines ; c'est là qu'elles se réunissent : il faut leur ménager un écoulement au dehors, si on ne veut pas qu'elles séjournent dans les creux et qu'elles entraînent la pourriture des récoltes en herbe.

Dans les terrains suffisamment perméables ou possédant une certaine inclinaison, l'égouttement se fait de lui-même vers les vallées.

Au contraire, dans les pays plats peu perméables, il faut pourvoir à l'écoulement. C'est ce qu'on fait au moyen de raies de travers : ces raies, ouvertes à la charrue ou à la bêche, sont plus profondes que les raies ordinaires ; elles coupent les planches soit normalement, soit en biais, et recueillent par conséquent le débit de toutes les parties creuses séparant les planches successives. L'eau de ces raies de travers ou rigoles est conduite dans des fossés de grandeur croissante et s'écoule vers les vallées par des pentes convenablement ménagées.

Ces opérations se font à simple vue, sans qu'il soit besoin de recourir à un nivellement. Cependant, il est hors de doute qu'en bien des cas le cultivateur aurait intérêt à relever avec un niveau d'eau le relief des surfaces à assainir, et qu'il arriverait, grâce à un plan d'ensemble, à des résultats plus satisfaisants et plus économiques.

Les rigoles ont l'inconvénient de faire perdre à la culture la surface horizontale qu'elles occupent ; de plus, elles gênent la circulation des machines agricoles. Aussi, lorsqu'on est conduit à les multiplier outre mesure, on préfère leur substituer le drainage ou desséchement par voie souterraine, qui agit d'une manière plus active sur la constitution physique du sol. Mais le drainage est coûteux ; dans bien des cas, l'exécution des rigoles à ciel ouvert est suffisante pour l'assèchement et doit être préférée.

Bien que les projets de desséchement par fossés et rigoles ne présentent pas de difficultés, nous donnons sur la figure 2 de la planche II le plan relatif à un projet de ce genre, dressé pour assainir un bois, limitrophe de la forêt d'Orléans, c'est-à-dire planté sur un sol argilo-sableux, à peu près imperméable.

La figure n'indique qu'une partie de la pièce à l'échelle de $\frac{1}{1000}$, avec ses courbes de niveau dessinées de dix en dix centimètres d'altitude. Un cours d'eau naturel *efd* la traverse; c'est un ruisseau intermittent qui s'assèche en été et qui doit être fréquemment curé. L'assainissement peut se faire : 1° au moyen de fossés tracés le long des chemins et sur les limites de la propriété; 2° au moyen d'autres fossés, dont il convient d'arrêter avec soin le tracé. Pour trouver le plus de pente possible, ce qui permet de diminuer les sections et d'assurer un écoulement plus rapide, on dirigera les fossés principaux suivant les lignes de plus grande pente. C'est ainsi qu'on a établi les fossés *gf*, *bc*, *hd*, dont l'effet a été satisfaisant.

Il est à remarquer que l'assèchement des bois ne peut se faire que par des fossés et que l'emploi des tuyaux de drainage y est impossible, car ils ne tarderaient pas à être dérangés et obstrués par les racines des arbres.

Le projet complet d'assainissement pour une pièce de 13 hectares s'élevait à 725 francs, ce qui représente une dépense de 55 à 60 francs par hectare.

Des dispositions analogues peuvent être adoptées en bien des circonstances : s'il s'agissait de terrains exceptionnellement humides, on devrait compléter le système des fossés dirigés suivant les lignes de plus grande pente, par des rigoles tracées à peu près suivant les lignes de niveau.

L'ensemble de ce système est en usage en Angleterre, où on le connaît sous le nom de drainage à moutons (sheep drain).

Ainsi que l'a fait ressortir M. Belgrand dans ses études hydrologiques sur le bassin de la Seine, l'espèce bovine convient aux sols imperméables, et l'espèce ovine aux terrains perméables. — Il s'agit, bien entendu, d'animaux qui ne sont pas nourris à l'étable, mais qui doivent vivre toute l'année par la pâture qu'ils trouvent dans les champs. — En effet, les sols imperméables, et par conséquent humides, sont les seuls qui produisent les prairies naturelles et qui soient capables de nourrir les animaux de l'espèce bovine; l'espèce ovine, au contraire, trouve une alimentation suffisante en broutant les herbes des terrains perméables. Elle est du reste très-sensible à l'humidité et la pourriture se développe fréquemment dans les troupeaux de moutons qui séjournent sur des sols imperméables : c'est pour obvier à cet inconvénient que les Anglais établissent leur drainage à moutons.

Cependant il faut remarquer qu'un sol d'une excessive perméabilité ne donne pas aux moutons, pendant l'été, une nourriture suffisamment aqueuse, et qu'ils deviennent alors sujets à des coups de sang qui entraînent la mort. Dans les deux cas le remède est indiqué : la pourriture peut se combattre en faisant passer les troupeaux dans un pays perméable, et la disposition aux coups de sang s'atténue grâce à une nourriture plus aqueuse.

Ces considérations intéressantes nous ont paru se rattacher à la question des desséchements.

DESSÉCHEMENT DES MARAIS PONTINS.

Les marais pontins planche III, s'étendent, au sud de Rome, le long de la mer Tyrrhénienne, qui les baigne à l'ouest et au sud. La côte tourne à angle droit de l'ouest au sud, et le sommet de l'angle est occupé par le mont Circé; le mont Circé était autrefois une île qui s'est reliée à la côte, grâce aux atterrissements et aux alluvions dont sont formés les marais pontins. En France, sur les côtes de la Manche, le mont Saint-Michel nous présente un effet analogue; à haute mer, il est encore entouré par les eaux, mais, avec le progrès des alluvions, il finira par se relier à la terre ferme. Dans le sens parallèle à la mer, de Cisterna jusqu'à Terracine, l'étendue du sol pontin est de 42 kilomètres; sa largeur est de 17 kilomètres; à l'est, les marécages finissent au pied du versant d'un rameau des Apennins.

L'action de la mer a formé sur le littoral une double ligne de dunes dont la présence gêne considérablement la marche, tant des eaux pluviales qui tombent dans le bassin pontin, que des eaux courantes qui le traversent descendant de la montagne.

Les eaux supérieures coulent dans huit ou dix lits principaux qui n'ont, à eux tous, qu'un seul débouché à la mer, en un lieu appelé Badino, à 5000 mètres au-dessus de Terracine. Les eaux rencontrent mille obstacles qui les empêchent d'arriver à ce débouché. On avait bien ouvert, autrefois, à travers les dunes du littoral, un canal ou fosse appelé Rio Martino; mais les émissaires de ce genre s'ensablent très-vite s'ils ne sont l'objet d'un entretien assidu.

A l'origine de l'histoire romaine, on voit le pays pontin habité par les Volsques; après la conquête, la transformation du pays en marécage marcha à grands pas. En l'an 442 de Rome, Appius Claudius fit construire, dans la longueur des marais pontins, la fameuse voie Appia, que les Césars réparèrent quelques siècles après.

Un desséchement, entrepris sous Théodoric, par le patrice Decius, aurait conduit, paraît-il, à de bons résultats. Quoi qu'il en soit, l'œuvre ne fut pas poursuivie au moyen âge; elle fut reprise, en 1777, par le pape Pie VI, qui y dépensa plusieurs millions.

Sous Napoléon Ier, un projet définitif, rédigé après de longues études, fut présenté par de Prony, qui en a rendu compte, en 1818, dans un remarquable mémoire auquel nous empruntons les renseignements qui précèdent et ceux qui vont suivre.

Les sondages opérés dans le marais, sur son bord oriental, au pied de la montagne, à 16 kilomètres du rivage actuel, et poussés à 17 mètres au-dessous du niveau actuel de la basse mer, ont mis à jour, à cette profondeur, du sable marin, des coquillages et des débris de plantes marines. D'autres sondages, opérés sur des points plus rapprochés du mont Circé, ont donné le sable et les coquillages marins à une profondeur beaucoup moindre. Cette observation prouve bien : et que la mer a baigné le pied des montagnes qui limitent le côté oriental des marais, et que son fond s'abaissait sur un talus rapide à partir de la rive antique; la lagune pontine a donc pu offrir aux vaisseaux une rade fermée dont la passe principale était peu éloignée de l'emplacement qu'occupe Terracine et du débouché actuel de Badino.

La conséquence générale des faits ci-dessus rapportés est que le remplissage de la lagune pontine a été la suite naturelle et nécessaire de l'affluence de plusieurs fleuves et torrents qui, descendant des montagnes, ont entraîné dans leur cours une grande quantité de matières solides.

Les alluvions ont été d'autant plus abondantes, et leurs effets d'autant plus rapides, que les époques auxquelles elles ont eu lieu sont plus reculées, parce que les montagnes étaient plus garnies de terre, et en ont ensuite fourni de moins en moins à mesure que leur ossature s'est dépouillée.

L'étendue et l'épaisseur du sol tourbeux que renferme la plaine pontine prouvent, dit de Prony, la grande part qu'a eue la décomposition des plantes à son exhaussement; et cette cause d'atterrissement, dans un terrain où la végétation a une force extrême, est une des principales de celles auxquelles il faut attribuer l'état marécageux où cette plaine est restée. On a besoin du témoignage de ses yeux pour croire aux effets qu'ont sur l'écoulement de l'eau, et, par conséquent, sur sa hauteur, les obstructions des canaux par les plantes aquatiques. Nous avons vu des fauchaisons rapidement exécutées dans les fonds de ces canaux les faire baisser presque subitement d'un demi-mètre; et, d'après cette expérience, on conçoit aisément combien la végétation, abandonnée à elle-même, doit favoriser l'inondation sur un terrain d'une faible déclivité. Un canal ainsi purgé ne tarde pas à s'encombrer de nouveau, et c'est une guerre indispensable et continuelle qu'il faut livrer à la nature.

La première chose à déterminer dans un projet de desséchement, c'est, suivant de Prony, le tracé de l'axe principal d'écoulement, c'est-à-dire de la ligne suivant laquelle l'écoulement sera le plus facile et le plus prompt; c'est la ligne principale de thalweg.

Si la surface à dessécher est un plan incliné, toutes les lignes de plus grande pente sont des axes principaux d'écoulement; si la surface est cylindrique ou conique, l'axe principal d'écoulement est la génératrice inférieure du cylindre ou du cône.

Suivant l'axe principal d'écoulement, on établit un canal central dont la fonction principale et presque exclusive est de conduire hors du sol à dessécher les eaux pluviales qui tombent sur sa surface.

Autant que possible, il faut écarter du canal central les eaux chargées de limon, afin d'éviter la formation des dépôts dans ce canal, qui, naturellement, doit être, sur la surface à dessécher, un de ceux dont la pente est la moindre, et qui ont, par conséquent, le plus de tendance à s'envaser.

Il ne faut pas cependant priver entièrement le canal central d'eaux courantes; car, s'il est réduit à ne recevoir que les eaux pluviales qui lui arrivent transversalement de la surface marécageuse, ces eaux pourront ne pas former un corps suffisant; l'intermittence de l'écoulement est toujours funeste : on sait combien les canaux qui restent à sec une partie de l'année sont sujets à s'encombrer et exigent de travaux coûteux d'entretien.

Il est donc convenable et nécessaire de jeter sur l'axe principal d'écoulement une certaine quantité d'eaux claires pérennes, qui servent de véhicule aux eaux pluviales arrivant de la surface marécageuse, et contribuent singulièrement à maintenir le canal central en bon état.

Il faut calculer, d'après les règles de l'hydraulique, les pentes et la section du canal central de telle sorte qu'il soit capable de débiter la quantité maxima d'eau qui puisse se présenter; mais cela ne suffit pas; il faut assurer, en outre,

l'arrivée au canal central de l'eau pluviale qui tombe sur le sol à dessécher; c'est là une condition essentielle à remplir.

L'eau pluviale, qui tend à arriver au canal central par la déclivité naturelle des marais, rencontre dans son cours des obstacles multipliés qui la retiennent si, sur une faible pente, elle a un trop grand espace à parcourir pour arriver à destination; dans ce dernier cas, la surface sur laquelle l'eau pluviale se maintient stagnante reste marécageuse. Il faut donc recueillir les eaux de pluie qui tombent à une trop grande distance du canal central, dans des fossés auxiliaires, espacés de telle sorte que l'eau, tombant en un point quelconque du marais, ait toujours un récipient inférieur où elle puisse arriver avant que son mouvement soit éteint par les obstacles qu'elle rencontre sur cette surface.

Ces fossés auxiliaires rempliraient très-imparfaitement leur but, si on les creusait perpendiculairement au canal central, c'est-à-dire dans le sens de la pente transversale en vertu de laquelle les eaux pluviales tendent à gagner le canal central; la plus grande partie de la surface comprise entre deux fossés auxiliaires consécutifs n'en retirerait aucune utilité et continuerait à retenir ses eaux.

L'objet qu'on doit avoir ici en vue est de tirer le plus grand parti possible de la pente transversale, d'où il suit évidemment que le tracé le plus avantageux des fossés auxiliaires est celui qui leur fait faire les angles les plus petits avec le canal central.

Cette observation de de Prony ne doit pas être généralisée. Elle est vraie lorsqu'il s'agit de marais à sol imperméable; s'il s'agit, au contraire, de marais à sol perméable, l'écoulement des eaux se fait souterrainement vers les fossés, et la puissance d'asséchement de ceux-ci dépend surtout de leur espacement.

Le principal élément du calcul des dimensions des canaux est la hauteur d'eau pluviale qui tombe sur le marais à dessécher; grâce à l'organisation actuelle des services météorologiques, on possède de précieux renseignements sur la marche des pluies dans la plupart des régions. Les dimensions des canaux d'écoulement se calculent, non pas d'après la moyenne de la hauteur des pluies, mais d'après la hauteur qui tombe en un jour pluvieux. Il va sans dire que l'on ne prend point pour base ces pluies exceptionnelles qui se produisent avec une grande violence, mais qui sont rarement de longue durée.

Abstraction faite de ces cas extraordinaires, les eaux habituelles doivent être encaissées dans les canaux et y avoir leur surface au-dessous de la campagne, de manière à ne pas nuire à la végétation. Pour les terres susceptibles de produire des céréales, l'abaissement doit être d'un demi-mètre au moins.

Les dispositions précédentes s'appliquent aux eaux pluviales du marais; il faut s'occuper aussi des eaux courantes pérennes qui proviennent soit des sources, soit des versants du bassin. En ce qui touche les sources qui se rencontrent dans le bassin même, on les jette dans le canal central. — Les sources importantes se trouvent généralement à la base des versants, et il est facile de les réunir aux eaux torrentielles qui en descendent: la plus grande cause d'inondation du marais est précisément dans ces eaux torrentielles qui rencontrant un terrain plat s'y étalent et y divaguent. — A moins qu'il ne s'agisse d'eaux chargées d'un limon fertile et qu'on ne veuille dessécher le marais en l'exhaussant par un colmatage, les eaux des versants du bassin marécageux ne doivent pas être reçues dans le bassin lui-même, mais en être détournées par un canal de ceinture leur donnant un écoulement spécial.

Ce sont ces principes que de Prony appliqua dans son projet de dessèchement

des marais pontins : les anciens ingénieurs tenaient à l'idée séduisante d'avoir un émissaire unique pour les eaux tant intérieures qu'extérieures au bassin et cet émissaire unique devait être le canal Pio, qui borde la voie Appia. — Le canal Pio est bien dirigé suivant l'axe principal d'écoulement, mais il ne peut suffire à la fois à l'écoulement des eaux des versants et des eaux du marais pontin. — De Prony créait pour les eaux extérieures au bassin deux émissaires : l'un desservait la zone orientale, c'était l'ancien lit de la Ninfa dans lequel on jetait les eaux du torrent de Sermonetta, il se continuait entre la voie Appia et le passo San Donato, sous les noms de canal della Mola et de Rio Francesco, et allait ensuite à la mer sous les noms de Fiume Sisto et de canal delle Volte ; l'autre émissaire desservait la zone occidentale et venait se joindre au précédent.

A l'extrémité orientale des marais, on trouvait deux fleuves, l'Amazeno et l'Uffente ; le lit du premier a été recreusé et dirigé au travers d'un terrain bas et très-marécageux, appelé Pantano d'Inferno : le second a été changé et est venu rejoindre l'Amazeno sous le pont Maggiore, d'où toutes les eaux réunies vont se rendre au portatore qui les conduit au débouché général de Badino.

En ce qui touche les eaux intérieures du bassin, de Prony réservait au canal Pio la fonction exclusive de les conduire jusqu'au portatore de Badino.

Nous n'entrerons pas plus avant dans la description des travaux projetés, puisqu'ils ne furent point suivis d'exécution. Nous avons cru devoir analyser le mémoire de de Prony, parce que les principes posés par lui ont reçu depuis de nombreuses applications.

DESSÉCHEMENT DES MARAIS ENTRE BEAUCAIRE ET AIGUES-MORTES.

La figure 1 de la planche IV est un plan du canal de Beaucaire à Aigues-Mortes et des marais qui l'avoisinent, principalement de ceux qui sont compris entre le canal et le petit Rhône.

Le canal de Beaucaire à Aigues-Mortes fut commencé en 1773 et terminé sous le premier Empire par MM. les ingénieurs Grangent père et fils. Il avait pour but principal d'affranchir le commerce de la navigation difficile et dangereuse du petit Rhône.

Le bassin marécageux qui nous occupe est limité au nord par le canal de Beaucaire à Aigues-Mortes, à l'est et au sud par les digues insubmersibles établies le long du Rhône depuis Beaucaire jusqu'à Silvéréal, à l'ouest par les francs bords des canaux du Bourguibou et de la Radelle.

Nous ne considérerons que les marais au sud du canal, qui se divisent en deux classes : les marais supérieurs entre Beaucaire et Saint-Gilles, et les marais inférieurs s'étendant de Saint-Gilles jusqu'à une ligne pointillée allant du petit Rhône au canal en passant au nord de l'étang du Lairau. Le projet que nous étudions en ce moment est celui que M. l'ingénieur en chef Grangent a décrit dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1832.

Les marais supérieurs, d'une superficie de 6055 hectares, ont été d'abord mis à l'abri de l'afflux des eaux, qui s'écoulent des versants environnants et ce résultat a été obtenu au moyen d'une digue et d'une rigole de ceinture. — Cette

rigole de ceinture s'appuie sur le canal au point *a*, elle contourne les marais et vient se rattacher au canal au pont d'Arles en avant de Bellegarde. — Au point *b*, elle se bifurque et se prolonge jusqu'à la limite du territoire de Saint-Gilles, de manière à enceindre les surfaces marécageuses comprises entre Bellegarde et Saint-Gilles.

Les terrains ainsi protégés par la digue ne reçoivent plus que les eaux pluviales ; il est facile de les assécher au moyen de fossés conduisant ces eaux dans le canal.

La digue de ceinture est flanquée d'un canal d'évacuation qui reçoit les eaux des terres cultes supérieures et les conduit dans le canal et dans le contre-canal méridional juxtaposé au canal principal ; l'évacuation s'opère au moyen de déversoirs ménagés au-dessous de l'écluse de Nourriguier, au pont d'Arles, au-dessous de l'écluse de Broussan, et aux limites des territoires de Bellegarde et de Saint-Gilles.

Lorsque des pluies exceptionnelles menacent d'inonder les terres cultes au-dessus de la digue de ceinture, on ouvre des vannes ménagées dans cette digue, et les parties autrefois marécageuses se trouvent inondées d'une manière passagère ; quand l'humidité cesse, l'asséchement est rapidement obtenu de nouveau.

Ce desséchement a eu le plus grand succès, dit M. Grangent, dans son mémoire.

En ce qui touche les marais inférieurs, leur desséchement présentait beaucoup plus de difficultés : leur sol est, en effet, peu élevé au-dessus des basses eaux de la mer et en quelques parties il est même au-dessous du niveau de la mer. Dans ces conditions, l'opération de desséchement se présentait mal au point de vue économique ; aussi n'a-t-elle pas été abordée.

Généralités sur les marais du littoral de la Méditerranée. — M. l'ingénieur Duponchel, dans divers mémoires insérés aux *Annales des ponts et chaussées* et dans son *Traité d'hydrologie*, a examiné avec le plus grand soin la question des marais et des étangs du littoral de la Mediterranée. Les principales observations, présentées par M. Duponchel, trouveront ici leur place naturelle.

Les atterrissements du littoral méditerranéen, à l'ouest du Rhône, sont dus aux masses énormes de limons charriés par ce fleuve et entraînés par le courant littoral qui dans la Méditerrané existe de l'est à l'ouest.

Ce courant, dirigé de l'est à l'ouest, a laissé vers sa droite, dans les découpures du continent, des masses d'eaux stagnantes qui bientôt se sont trouvées séparées de la pleine mer par des dépôts ou cordons littoraux de forme régulière.

Les lagunes ainsi isolées de la haute mer par les cordons littoraux, en partie atterries par les divers cours d'eau qui s'y jettent, constituent, dit M. Duponchel, nos plaines les plus fertiles, en même temps que les marais et les étangs de notre littoral.

Loin de l'embouchure des rivières limoneuses, ces étangs ont en partie conservé leur profondeur première et, comme l'étang de Thau, forment des nappes navigables, communiquant avec la Méditerranée par un petit nombre de coupures soit permanentes, soit accidentelles qui, sous le nom de graus, établissent un équilibre de niveau entre les deux masses d'eau.

Mais, pour le plus grand nombre, ces étangs ont été peu à peu atterris et comblés par les rivières et les torrents qui descendent en grand nombre des dernières chaînes des montagnes des Cévennes.

Suivant l'énergique expression de de Prony, c'est la chaire des montagnes

que les eaux entraînent et qui vient combler les dépressions des plaines.

Action du sel. — En fait de desséchement dans les pays méridionaux, il est une question qui prime tout, c'est celle du dessalement du sol. M. Duponchel l'expose en ces termes.

« Tous les terrains qui se sont trouvés, à une époque même très-reculée, en contact avec la mer restent imprégnés de sel marin, qui, suivant les conditions atmosphériques, produit des effets très-différents.

Sous le climat toujours humide et brumeux des contrées du Nord, le sel, constamment dissous par un excès d'eau pluviale, s'écoule et s'infiltre dans le sol et ne produit aucun effet fâcheux pour la végétation, qu'il accélère même quelquefois.

Il en est tout autrement sous le climat plus sec des départements bordant la Méditerranée, et en général de toutes les contrées où l'évaporation naturelle est supérieure à la quantité d'eau pluviale.

Ce résultat est dû à l'action d'une loi physique connue sous le nom de *capillarité*, en vertu de laquelle, contrairement aux lois générales de la pesanteur, les liquides s'élèvent au-dessus de leur niveau naturel, dans les tubes de très-petite dimension, et par suite dans les corps poreux qui peuvent être considérés comme une agglomération de tubes capillaires.

Tous les terrains, surtout lorsqu'ils sont en culture, étant plus ou moins poreux, se trouvent dans des conditions propres à produire le phénomène de la capillarité. Dès que, par l'évaporation, l'eau qui remplissait une partie des pores supérieurs vient à disparaître, l'eau des couches inférieures, remontant dans ces pores ou tubes capillaires, arrive à la surface, où elle s'évapore à son tour, et est nécessairement remplacée par le liquide des couches plus basses. Si, dans de telles conditions, cette eau contient une quantité notable de sel, comme cela a lieu dans les terrains marécageux du littoral, il se dépose naturellement à la surface du sol en couches cristallisées qui s'opposent à toute végétation.

Avant de mettre en culture un terrain desséché, il est donc nécessaire de le dessaler; mais cette opération présente des difficultés qu'on n'a jamais pu surmonter jusqu'ici d'une manière complète.

Il ne suffirait pas, comme beaucoup de personnes sont malheureusement disposées à le croire, de quelques irrigations, du passage plus ou moins rapide d'un courant d'eau douce, pour se débarrasser du sel contenu dans le sol. Si nous nous représentons en effet la surface d'un marais recouvert de la croûte saline dont nous venons d'expliquer la formation, on comprendra que la première eau qui tombe doive dissoudre cette couche de sel et pénètre avec elle dans les conduits capillaires, où, par l'effet de sa plus grande pesanteur, elle est retenue jusqu'à ce qu'une nouvelle évaporation superficielle la ramène à la surface.

C'est donc toujours la même quantité de sel qui reparaît au jour pendant les grandes chaleurs de l'été, qui redescend dans les profondeurs du sol aux premières pluies d'automne, sans que de grandes submersions d'hiver puissent en entraîner une proportion notable.

Cette ascension du sel des couches inférieures est en quelque sorte proportionnelle à l'excès de l'eau évaporée sur l'eau pluviale tombée pendant l'année. Dans les pays où cet excès est considérable, comme sur le littoral du Languedoc et de la Provence, la montée du sel rend toute culture impossible; dans les contrées humides, au contraire, l'excès d'eau pluviale qui s'infiltre dans le sol tend à éloigner de plus en plus le sel de la surface des terrains nouvellement desséchés, et permet de les cultiver presque immédiatement.

La théorie que nous venons d'exposer, et qui est connue depuis longtemps, ne repose pas sur une vaine hypothèse ; les résultats n'en sont que trop confirmés par une multitude de faits faciles à vérifier.

C'est ainsi que dans un grand nombre de nos marais, couverts d'une épaisse couche de sel en été, les eaux sont à peine saumâtres pendant l'hiver.

Sur les bords du Rhône, sur ceux de l'Aude, de vastes plaines qui depuis deux siècles sont à l'abri de l'irruption des eaux de la mer, et périodiquement couvertes et lavées par des torrents d'eau douce, n'en sont pas moins sujettes à cette action du sel, qui remonte de profondeurs considérables; qui, dans bien des endroits, ne tarde pas à traverser, quelle qu'en soit la hauteur, les nouvelles couches d'alluvions dont ces terrains sont parfois recouverts, sur une forte épaisseur, à la suite d'une grande inondation.

Il ne suffirait donc pas de dessécher un de nos marais du littoral pour pouvoir le mettre en culture. Tant qu'on ne sera pas parvenu à le dessaler entièrement, on n'aura obtenu qu'un résultat à peu près nul.

Cette opération du dessalement, qu'on nous passe ce néologisme, est-elle tout à fait impraticable? Nous ne le pensons pas.

Des essais tentés, quoique d'une manière fort incomplète, sur quelques points de la Camargue, nous ont mis sur la voie d'un procédé qui, appliqué d'une manière convenable, doit donner un succès infaillible: nous voulons parler du drainage des marais.

On conçoit, en effet, que lorsqu'une terre convenablement drainée vient à être fortement imbibée par les pluies, l'excédant d'eau qui s'infiltre de haut en bas à travers les pores du terrain doit s'écouler par les tuyaux de drainage, chargée d'une notable partie du sel. Si, à part les pluies, on peut encore disposer d'irrigations artificielles, si surtout on peut faire alternativement pénétrer et ressortir les eaux par les tuyaux de drainage, il se produit nécessairement, dans tous les pores du sol, un double courant qui doit promptement débarrasser le terrain du sel qui s'y trouve contenu dans toute l'étendue d'action des tuyaux de drainage. »

DESSÉCHEMENT DE L'ÉTANG DU POURRA.

L'étang du Pourra, figure 1 planche II. fait partie d'un groupe de plusieurs étangs compris entre l'étang de Berre, la Méditerranée et la plaine de la Crau.

Sa superficie est de 140 hectares, il est voisin de plusieurs communes et particulièrement de la commune de Sainte-Mitre, qui recevait par les vents du sud-ouest les émanations pestilentielles et qui était ravagée par les fièvres. Aux époques d'épidémie, pendant l'été, il y avait 1100 malades sur 1200 habitants de ce malheureux village.

En 1562, l'étang de Pourra faisait partie du domaine royal; en 1566, il fut concédé par Charles IX à un seigneur Caderet, à la charge de le dessécher et de le mettre en culture. — En 1777, le desséchement fut effectué, mais les galeries d'évacuation furent bouchées quelques années après, et ce n'est qu'après 1840 qu'on arriva à faire disparaître définitivement le foyer d'infection.

M. l'ingénieur Vallés a publié dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1855 une intéressante notice hydrographique et topographique sur le groupe d'étangs

dont fait partie celui qui nous occupe. C'est à cette notice que nous puiserons les renseignements qui vont suivre.

Le groupe des étangs est enfermé entre l'étang de Berre, la Méditerranée et la plaine de la Crau.

L'étang de Berre, dépendance de la Méditerranée, lui est relié par le canal de Caronte, d'environ 1 kilomètre de large et de 7 kilomètres de long, lequel s'étend du port de Bouc à la ville des Martigues.

La Crau est une immense plaine stérile de cailloux roulés, dont la moindre dimension est de 20 kilomètres, témoignage imposant de l'intensité des courants qui ont sillonné l'écorce terrestre. La cote moyenne de la Crau, qui est uniformément inclinée vers la mer, est de 32 mètres. Quelques parties de la Crau sont devenues très-fertiles, grâce aux colmatages opérés avec les eaux troubles de la Durance.

La langue de terre comprise entre la Crau et l'étang de Berre porte diverses collines élevées de 40 à 50 mètres au-dessus du niveau de la mer, et formant huit bassins annulaires ou cuvettes à contour elliptique : dans chaque cuvette existait un étang.

L'étang de Mégrignan a été desséché grâce à un souterrain *h h* de 500 mètres de longueur qui débouche dans l'étang de Berre à un niveau inférieur à celui du fond de l'étang de Mégrignan. La surface de Mégrignan est livrée maintenant à la culture.

L'étang du Pourra, dont nous avons dit plus haut la pernicieuse influence sur les villages voisins, est aujourd'hui desséché, et les eaux qu'il reçoit s'égouttent dans l'étang d'Engrenier par un souterrain de 600 mètres de long.

L'étang d'Engrenier, dont les eaux saumâtres marquent 9 à 10° à l'aréomètre, est séparé de l'étang de la Valduc par une langue de terre sablonneuse et très-basse appelée le plan d'Aren; c'est sur ce plan que sont établies des salines et des fabriques de soude.

L'étang de Fos communique avec la mer par filtration à travers la colline sablonneuse qui les sépare.

L'étang de la Valduc, le plus grand et le plus important, ne communique pas avec la mer; il est alimenté par les sources et les puits; sa salure varie suivant les saisons de 13° à 22° à l'aréomètre, tandis que la salure des eaux de la mer sur les côtes est de 1° 1/2 à 2° 1/2. — Cet étang est donc précieux au point de vue industriel, mais la vie végétale ou animale y est impossible.

L'étang de Citis reçoit les eaux salées de l'étang de la Valduc par un souterrain double *c d*, et ces eaux alimentent les salines, dont le produit est transporté au port du Ranquet par une voie ferrée *e e* établie en souterrain.

L'étang de Rassuen est aussi une saline dans laquelle des pompes à vapeur envoient de l'eau puisée à l'étang de la Valduc.

L'étang d'Istres est mis en communication avec la mer par un souterrain *a a*, de sorte que son niveau demeure sensiblement constant, quelle que soit l'intensité des pluies, et les parties basses de la ville d'Istres ne sont plus submergées comme autrefois.

De ce qui précède, il résulte que les étangs de Mégrignan, du Pourra et de Rassuen ont leur fond au-dessus du niveau de la mer. Les étangs de Fos et d'Istres sont au même niveau que la mer. Quant aux trois autres étangs, Engrenier, la Valduc et Citis, leurs eaux sont au-dessous de celles de la mer; le fond de la Valduc descend jusqu'à 16 mètres au-dessous du niveau de la mer, et celui d'Engrenier jusqu'à 11^{m},50. La concentration des eaux salées de l'étang de la

Valduc tient à l'importance de l'évaporation sous le climat méridional : l'évaporation n'enlève que de l'eau douce; les pertes ne sont pas réparées par la pluie, et l'eau salée, provenant soit des sources, soit de l'eau de mer qui a primitivement rempli les étangs, se concentre peu à peu.

DESSÉCHEMENT DES MARAIS DE BOURGOIN (ISÈRE).

Les marais de Bourgoin s'étendent dans la vallée du Guiers et de la Bourbre ; ces vallées, qui se terminent toutes les deux au Rhône, lequel a décrit une boucle dans l'intervalle, sont dans le prolongement l'une de l'autre et séparées par un plateau qui est leur ligne de faîte. L'ensemble des vallées a une longueur d'environ 60 kilomètres avec une largeur moyenne de 1200 mètres, d'où une superficie de 7200 hectares de terrains marécageux.

L'existence des marais tenait non à l'absence de pente, car la pente de la vallée est toujours de $0^m,30$ à $0^m,60$ par kilomètre, mais à l'insuffisance du débouché des rivières ; lors des grandes eaux, la vallée entière était submergée, et, les berges étant toujours plus élevées que les parties latérales, l'écoulement ne se faisait plus, les parties latérales conservaient une eau stagnante et se transformaient en marécages.

Les chaleurs de l'été changeaient ces marécages en un amas de vases corrompues dont les miasmes pestilentiels décimaient les populations voisines.

Les marais de Bourgoin étaient jadis une propriété domaniale que Louis XIV concéda à Turenne ; le desséchement ne fut réellement entrepris que sous le premier Empire et terminé vers 1814.

Le système de desséchement comprend deux grands canaux, qui ont eu pour effet de redresser et de canaliser les rivières principales, la Bourbre et le Catelan. — Les sections sont calculées en raison des variations du volume des eaux et des variations de la pente. — Sur les deux grands canaux se ramifient des canaux secondaires dont la largeur en gueule varie de 3 à 6 mètres. Il existe environ 200 kilomètres de canaux de toute nature.

Malheureusement, les travaux primitifs furent abandonnés à eux-mêmes, et avec le défaut d'entretien les inondations d'hiver reparurent ; les terres conquises menaçaient de revenir à l'état de marécages. — Un syndicat dut être organisé pour assurer l'entretien, chose capitale dans les travaux de ce genre ; si l'entretien est négligé, les plus belles entreprises de desséchement ne tardent pas à dépérir.

ASSAINISSEMENT DES LANDES DE LA GIRONDE.

Dans notre *Traité de Géologie*, nous avons dit les causes de la formation des landes de la Gascogne, qui s'étendent le long de l'Océan, entre la Gironde et l'Adour, et qui sont séparées de la mer par des dunes en arrière desquelles on trouve des surfaces marécageuses et des étangs. — Les dunes ont été fixées par les plantations de sapins, suivant les indications de Brémontier ; mais les landes restaient toujours insalubres, et il fallait les assainir en ménageant aux eaux un

écoulement suffisant. C'est ce qui a été fait depuis 1850 : la description des travaux se trouve dans les notices recueillies à l'occasion de l'Exposition universelle de 1867. Nous allons la reproduire ici :

« *Exposé préliminaire.* — Toute l'étendue de terrains connue sous le nom de *Landes*, qui se trouve comprise entre la mer et les vallées de la Garonne et de l'Adour, présente une superficie d'environ 8000 kilomètres carrés, dont la presque totalité, en 1850, était encore inculte et inhabitée. On n'y trouvait de loin en loin que quelques chaumières isolées et quelques bouquets de pins inaccessibles l'hiver, par suite de l'inondation des terrains environnants.

Depuis longtemps de nombreux essais avaient été faits pour la mise en culture de cet immense désert, mais ils avaient tous échoué devant l'insalubrité du pays et la stérilité du sol.

En 1849, à la suite de plusieurs années d'études, il fut constaté qu'on pourrait assainir toute cette vaste étendue de terrains marécageux par des travaux fort simples, d'une dépense très-minime eu égard à la grandeur des résultats à obtenir, et que cet assainissement aurait pour effet de donner à ces terrains, jusque-là si stériles, une fertilité extraordinaire, qui permettrait de les mettre de suite en culture forestière, moyennant une très-faible dépense.

Les premiers résultats obtenus par des essais pratiques furent reconnus si concluants, qu'une loi fut rendue, le 19 juin 1857, pour prescrire l'application de ces travaux d'assainissement et de mise en valeur à toutes les landes communales des deux départements de la Gironde et des Landes, qui forment la plus notable portion des landes incultes et malsaines.

Dispositions générales, objet et utilité des travaux. — Les landes constituent un vaste plateau presque entièrement horizontal, composé d'un sol maigre et sablonneux, sans aucune trace d'argile ou de calcaire, d'une épaisseur de $0^m,60$ environ, reposant sur un sous-sol imperméable.

Il n'existe sur le plateau aucune source, aucune trace d'eau à la surface pendant l'été ; mais en hiver, au contraire, les eaux pluviales, si abondantes sur ces côtes de l'Océan, s'abattent pendant plus de six mois sur le plateau, et n'y trouvent ni écoulement intérieur, ni écoulement superficiel ; elles y restent stagnantes jusqu'à ce qu'elles aient été évaporées par les chaleurs de l'été. Ainsi, l'inondation permanente l'hiver, la sécheresse absolue d'un sable brûlant l'été, tels sont les caractères principaux du terrain.

Qu'on se figure maintenant l'effet de ce passage continuel d'une inondation de six mois à une longue sécheresse, et on aura l'idée de la stérilité du sol pour toute culture, et de son insalubrité pour les animaux et les malheureux habitants ; on comprendra quels mécomptes devaient accompagner tous les essais tentés avant qu'on eût pensé à y faire disparaître ces deux causes si nuisibles à tout développement agricole.

Description des travaux. — Les travaux d'assainissement et de mise en valeur exécutés par les ingénieurs se sont étendus dans la Gironde sur 49 communes et comprennent une superficie de 106 616 hectares.

Une surface plus considérable a été assainie et ensemencée par les propriétaires.

Les travaux exécutés par l'administration pour les landes communales comprennent une longueur de voies d'écoulement de 925 kilomètres sur lesquels se trouvent 635 kilomètres de canaux neufs et 290 kilomètres de cours d'eau améliorés et élargis.

Les canaux, tracés suivant la ligne de plus grande pente du plateau, ont une

largeur moyenne de 5 à 6 mètres au plafond et une pente de $0^{m},002$ à $0^{m},001$ par mètre.

Pour la partie des landes qui se trouve sur le versant de l'Océan et dont les eaux sont arrêtées par la chaîne des dunes qui longe le littoral, sur une longueur non interrompue de 100 kilomètres, il a été nécessaire d'ouvrir un vaste collecteur de 12 mètres de largeur au plafond, reliant les différents étangs et desséchant tous les marais situés au pied de ce versant, tout en assurant l'écoulement de toutes les eaux du versant.

La totalité des dunes de la Gironde ayant été entièrement fixée depuis 1863, et se trouvant couverte aujourd'hui d'une belle végétation forestière, on a pu ouvrir ces canaux sans craindre l'ensablement par la marche des dunes. Ils fonctionnent aujourd'hui et débitent en moyenne 10 mètres d'eau par seconde.

Dépenses et résultats. — Le montant total des dépenses pour les travaux d'assainissement des landes communales de la Gironde ne s'élève qu'à 700 000 francs, ce qui fait à peu près 7 francs par hectare.

Les travaux d'ensemencement n'ont pas dépassé 8 francs par hectare, soit pour les 106 616 hectares, 852 928 francs.

Ce qui fait un total de 1 552 928 francs.

Il n'a été rien demandé sur cette somme ni à l'État ni au département. Les communes ont couvert elles-mêmes la totalité de la dépense avec le produit de la vente d'une très-faible partie de leurs landes communales assainies.

Dans le rapport à l'appui du projet de loi de 1857, en vertu duquel ces travaux ont été exécutés, on avait évalué à 33 francs le revenu d'un hectare de landes assainies et ensemencées à 25 ans.

Les exploitations qui ont eu lieu dans ces dernières années ont prouvé que ce chiffre était toujours dépassé, et que souvent il était même doublé ; en admettant seulement ce chiffre minimum de 33 francs, cela donnera un revenu d'au moins 3 518 000 francs, qui ira toujours en augmentant à partir de 25 ans, pour une dépense de 1 552 928 francs, faite sur un terrain précédemment sans valeur.

Les résultats hygiéniques qu'il était également indispensable de réaliser pour assurer l'exploitation du pays n'ont pas été moins grands.

Une enquête officielle faite en 1865 a établi que les fièvres qui ravageaient précédemment les landes avaient disparu, et que l'état sanitaire y était aujourd'hui aussi satisfaisant que dans les pays les plus sains de France.

Cette enquête a constaté encore que depuis l'ouverture des canaux d'assainissement, l'augmentation du nombre des naissances sur celui des décès avait suivi une progression croissante régulière, et qu'en 1865 elle était de 44 pour 100 en faveur des naissances.

Les travaux d'assainissement et de mise en valeur des landes de la Gironde ont été commencés sous la direction de MM. Malaure, ingénieur en chef, et Chambrelent, ingénieur ordinaire, et terminés sous la direction de MM. Chambrelent, ingénieur en chef, et Lemoine, ingénieur ordinaire. Ils ont été surveillés par M. Courret, conducteur des ponts et chaussées. »

Dans un rapport présenté à M. le ministre des travaux publics en 1856, M. l'ingénieur en chef Chambrelent fait ressortir quelques considérations intéressantes qui complètent la notice précédente.

Le terrain sablonneux des landes est sous un climat des plus favorables à la végétation. L'air y est très-vif ; il y règne, dès le mois de mars, un soleil chaud et fécondant ; de mars à mai, il y tombe des pluies fréquentes. L'eau de ces pluies est arrêtée à la surface du sol ; aussi, malgré les excellentes conditions cli-

matériques, les semis de glands ne peuvent réussir, parce que la chaleur nécessaire à la germination est absorbée par l'évaporation de l'eau. La germination n'arrive qu'en juillet, mais le plant naissant est brûlé par le soleil. Les pins arrivaient à germer, mais les plants ne profitaient pas de la chaleur, ils restaient jaunes et souffreteux. Au contraire, avec un terrain assaini, que les pluies du printemps ne font que traverser, la germination se fait à l'époque voulue, et les plants jettent de toutes parts leurs racines dans un sol léger et divisé ; ils ne tardent pas à prendre un développement rapide. — C'est surtout dans les parties basses, autrefois les plus mauvaises pour la végétation, que celle-ci se développe avec le plus de vigueur ; en effet c'est là que s'est accumulé l'humus entraîné par les eaux.

Les fossés des landes constituent un véritable drainage du sol, drainage extérieur ; ce système, qui ne conviendrait pas aux terres argileuses et compactes et qui a l'inconvénient de manger une grande partie du sol, était parfaitement approprié aux sables légers des landes, reposant sur une assise imperméable. Les fossés même sont un avantage, car ils permettent à l'air d'entourer les plantations, et en cas d'incendie, ils circonscrivent le fléau.

Une grande cause d'insalubrité des landes était le manque de bonne eau potable ; autrefois, on creusait un trou dans le sable et on en faisait une fontaine donnant une eau froide en hiver, chaude en été, chargée en tout temps de toute espèce de détritus et funeste à la santé. Mais, en descendant à une dizaine de mètres de profondeur, au-dessous de la première couche d'argile, des puits en maçonnerie dans lesquels on ne laisse point pénétrer la première couche d'eau superficielle, on arrive à des nappes dont l'eau, filtrée par son voyage souterrain, possède une température constante. Avec 500 francs de dépense, on est arrivé à construire ainsi des puits donnant une eau fraîche et limpide, et ç'a été pour la population un immense bienfait.

TRAVAUX D'AMÉLIORATION DE LA DOMBES.

A côté de l'assainissement des landes de la Gironde, il faut placer l'assainissement de la Dombes, vaste plateau situé dans le département de l'Ain.

Le volume rédigé par le ministère des travaux publics à l'occasion de l'Exposition universelle de 1873 renfermait la notice suivante sur les travaux d'assainissement de la Dombes :

Situation. — La Dombes, formée d'une partie des arrondissements de Bourg et de Trévoux (Ain), est située sur un vaste plateau s'inclinant vers le nord-ouest, et limitée par le Rhône, la Saône, l'Ain et les prairies de la Bresse.

Nature du sol. — Le sol de la Dombes a une profondeur moyenne de 30 centimètres; il est d'une composition suffisamment dotée en alumine, pauvre en calcaire et riche en silice et en fer. Le sous-sol, un peu plus argileux, un peu plus calcaire, est presque aussi riche que le sol en matières organiques.

Origine et développement des étangs. — La plupart des étangs de cette contrée sont de création assez moderne; il n'y en avait pas au quatorzième siècle au centre de la Dombes, là où ils sont aujourd'hui si nombreux. C'est à partir de cette époque que leur nombre s'accrut rapidement à la suite des guerres féodales qui décimèrent la population de la Bresse et de la Dombes.

L'ancien système de culture, fondé sur la jachère labourée, n'était plus possible alors; les bras faisaient défaut. La culture des étangs, c'est-à-dire la jachère en eau, lui fut substituée, afin de rétablir l'équilibre entre le travail à faire et les forces disponibles. La rigueur de l'abstinence à cette époque, le grand nombre de communautés religieuses, la fréquence des disettes assuraient d'ailleurs au poisson un écoulement rapide et un prix élevé. Aussi la création des étangs fut-elle l'objet de puissants encouragements. Tout particulier avait le droit d'élever une chaussée sur son fonds et d'inonder les terrains supérieurs, à la charge de laisser aux possesseurs de ces fonds la jouissance du sol durant l'assec, les droits de brouillage et de champéage durant la culture en eau, et de leur payer en outre une indemnité réglée par arbitre.

Etendue des étangs. — Le pays d'étangs a une surface de 112 725 hectares, non compris les cours d'eau et les chemins; sur cette superficie les étangs occupaient une contenance de 19 215 hectares; comme ils restent habituellement deux ans en eau et un an en culture ordinaire, la surface annuellement inondée dans la Dombes pouvait être évaluée à plus de 12 000 hectares.

Voies de communication avant la création du service de la Dombes. — A l'exception des routes nationale n° 8 et départementale n° 19, qui traversaient le centre du pays d'étangs, et des routes départementales n°s 3 et 17 qui longeaient la Dombes, les chemins de cette contrée, avant 1853, étaient impraticables. Comme ils étaient généralement creusés en contre-bas du sol, sans empierrement, sans fossés d'écoulement, les eaux de pluie y séjournaient la plus grande partie de l'année.

Routes agricoles. — En 1853, l'administration supérieure créa un service spécial de la Dombes confié aux ingénieurs des ponts et chaussées, et ayant pour mission d'étudier et de proposer les mesures propres à assainir ce malheureux pays.

Les habitants de la Dombes sont obligés de venir chercher à Bourg, à Vonnas, sur les rives de la Saône, du Rhône et de l'Ain, les fumiers, la chaux, les cendres et les amendements de toute sorte. Dans l'état où se trouvaient les voies de communication, le transport de ces produits était le plus souvent impossible ou trop onéreux; il fallait donc avant tout s'occuper de cette grave question de viabilité.

En 1854, le gouvernement décida la création d'un réseau de quinze routes d'une longueur totale de 242 kilomètres, et un décret du 15 mai 1869 autorisa l'exécution d'un deuxième réseau de quinze nouvelles voies destinées à compléter l'œuvre de transformation à laquelle le premier réseau a surtout donné naissance. Ces quinze nouvelles routes ont une longueur totale de 121k,715.

Les lignes terminées représentent aujourd'hui :

Une longueur de.	245k,872
Celles en cours d'exécution une longueur de.	62k,096
Et celles non commencées s'étendent sur.	55k,747
Total. . . .	363k,715

Les communes intéressées fournissent les terrains et exécutent les terrassements; l'État construit les ouvrages d'art et la chaussée d'empierrement. Les dépenses faites par l'État pour l'achèvement des 245k,872 de chemins livrés à la circulation se sont élevées à 1,018,259 fr. 80 c., soit 4 fr. 14 c. par mètre courant.

Chemin de fer de Bourg à Lyon, par la Dombes. — Si de nombreuses routes de terre étaient indispensables à la transformation agricole de la Dombes, sa situation tout exceptionnelle exigeait aussi des moyens plus puissants et plus économiques pour le transport des amendements et des engrais. En 1862, les ingénieurs étudièrent un projet de chemin de fer de Lyon à Bourg en traversant la Dombes diagonalement, et le 1er avril 1863, ce chemin de fer fut concédé à une compagnie moyennant une subvention de l'État de 3,750,000 francs.

Cette compagnie fut également chargée, au moyen de traités amiables passés avec les propriétaires, de dessécher et de mettre en valeur 6000 hectares d'étangs, moyennant une deuxième subvention de 1,500,000 francs, soit 250 francs par hectare.

Puits publics. — Les anciens puits de la Dombes sont peu profonds et fournissent des eaux de mauvaise qualité, qui sont une des causes morbifiques chez l'habitant de la contrée.

L'administration supérieure veut bien accorder aux communes de la Dombes qui en font la demande des subventions applicables à des travaux d'établissement ou d'approfondissement de puits publics. L'importance de la subvention est fixée aux trois quarts de la dépense des travaux qui s'exécutent d'après les projets et sous la surveillance des ingénieurs; 28 puits sont déjà construits dans 27 communes différentes, la dépense totale s'est élevée à 49,285 fr. 59 c.

Desséchement des étangs. — La compagnie du chemin de fer de la Dombes doit, aux termes de la convention ci-dessus précitée du 1er avril 1863, dessécher et mettre en valeur 6000 hectares d'étangs. Cette opération marche très-régulièrement sous le contrôle des ingénieurs. La compagnie a déjà desséché 434 étangs, d'une superficie totale de 4813 hectares 41 ares 43 centiares, et reçu en conséquence de l'État une somme de 1,200,000 francs, correspondant à une surface mise en valeur de 4800 hectares.

Curages. — Il y a vingt ans le lit des cours d'eau de la Dombes était obstrué; la retenue des moulins était trop élevée, et par suite les terrains bordant la rivière étaient, pour la plupart, transformés en marais. Dès la création du service de la Dombes, les ingénieurs s'occupèrent de la réglementation de la retenue des usines et des barrages d'irrigation et du curage des cours d'eau. Des syndicats furent organisés, et les travaux les plus urgents furent entrepris par leurs soins; quelques-unes de ces associations fonctionnent encore. Sur 298 kilomètres de cours d'eau de la Dombes, soumis à des syndicats, 91 furent curés et améliorés. Les dépenses atteignirent la somme de 146,500 francs environ, y compris diverses subventions s'élevant à 52,214 fr. 40 c. accordées par l'État.

Résultats obtenus. — Les sacrifices du gouvernement ont produit d'immenses résultats. La culture du seigle et de l'avoine a fait place à celle du blé; des prairies artificielles sont créées sur tous les points; les terres incultes, que l'on rencontrait jadis à chaque pas, sont rares aujourd'hui; la vigne même commence à apparaître partout, enfin la valeur du sol a doublé.

Chez l'habitant, une aisance relativement grande a remplacé la misère; le cultivateur, mieux nourri, est moins exposé aux influences climatériques. En 1857, les cas de fièvres paludéennes variaient de 50 à 90 0/0 dans les 16 communes du centre de la Dombes; en 1868, ils atteignaient à peine les chiffres de 4 à 9 0/0, et aujourd'hui les fiévreux sont très-rares. Dans ces mêmes communes, la mortalité sur 100 habitants, qui s'élevait à 4,04, n'a été, en 1870, que de 2,54; la population spécifique, qui était de 20,21 par kilomètre carré, s'était élevée, en 1870, à 31,12; enfin la durée de la vie moyenne, qui se

réduisait à 25 ans 3 mois et 14 jours, est actuellement de 35 ans 3 mois et 18 jours.

Le recrutement de l'armée montre, sous son vrai jour, ce qu'était avant toute amélioration la partie de la population qui parvenait jusqu'à l'âge viril. Les exemptions pour causes physiques s'élevaient en Dombes beaucoup plus haut que dans tout le reste de la France. Dans certaines communes, le nombre des jeunes gens refusés pour ce motif excédait celui des admissibles, et dans toute la Dombes, la moyenne atteignait 52 0/0.

En 1870, ce chiffre n'a été que de 15 0/0.

En attendant la révision du cadastre qui aura pour effet d'accroître singulièrement les revenus du Trésor, les résultats obtenus par l'accroissement notable des droits de mutation et d'enregistrement sur les propriétés et des impôts indirects, prouvent surabondamment que non-seulement le gouvernement a fait acte d'humanité et de justice en travaillant à la prospérité de la Dombes, mais encore qu'il y trouvera un placement des plus avantageux du capital engagé dans l'opération.

Les ingénieurs qui ont pris part aux travaux d'amélioration de la Dombes, depuis 1854 jusqu'en 1861, sont :

MM. Rolland de Ravel, Tarbé de Saint-Hardouin, Barreau, ingénieurs en chef des ponts et chaussées, et MM. Lamairesse, Ruinet et Garceau, ingénieurs ordinaires.

Depuis 1861, ces travaux ont été dirigés par M. Baudart, ingénieur en chef des ponts et chaussées, et par M. Bazin, ingénieur ordinaire.

La surveillance des travaux a été principalement confiée à MM. les conducteurs Parant et Perré.

Les entrepreneurs qui ont exécuté les ouvrages d'art étaient MM. Ratinet-Senetère et Abel; ceux qui ont entrepris les travaux de dessèchement sont MM. Mangini frères, à Lyon.

ASSAINISSEMENT DE LA SOLOGNE.

En traitant la question des engrais dans le chapitre de la chimie agricole, nous avons eu déjà l'occasion de parler de la Sologne. Nous compléterons ici les renseignements déjà donnés, et nous renverrons pour les détails au rapport de M. l'ingénieur en chef Sainjon, rapport inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de décembre 1874.

La Sologne, figure 2, planche I, s'étend sur les trois départements du Loiret, du Cher et du Loir-et-Cher. Elle est formée d'un sol exclusivement argilo-siliceux, dans lequel des sondages poussés à 60 mètres de profondeur n'ont pas révélé trace de chaux.

« Entièrement privé de l'élément calcaire, imperméable par suite de la constitution physique de ses argiles plus ou moins sablonneuses, le sol de la Sologne, dit M. Sainjon, est par lui-même infertile. Il faut le transformer pour lui faire produire des céréales, et, s'il se prête plus naturellement aux plantations et particulièrement à celles du pin et du sapin, la superficie boisable est forcément limitée par le quantum des frais qu'exige le transport des coupes.

« Il est en outre insalubre, aussi les fièvres paludéennes s'y reproduisent-

elles périodiquement; elles y atteignaient autrefois et y atteignent même encore aujourd'hui une certaine intensité. Ce n'est pas que les déclivités y soient très-faibles, ni que les eaux pluviales s'y écoulent difficilement. Les étangs n'y occupent pas non plus relativement une étendue très-considérable, et ne représentent, en définitive, qu'une faible fraction de la superficie totale. Mais, à raison de la nature imperméable des argiles qu'on rencontre partout, soit à la surface, soit à une faible profondeur, le sol ou le sous-sol sont constamment humides, et cette circonstance doit entrer pour beaucoup dans l'insalubrité naturelle du climat de la Sologne.

« Pour combattre l'insalubrité d'un climat semblable, il faut abaisser le plan d'eau du sous-sol, il faut curer les cours d'eau, drainer les terres, ouvrir des fossés d'assainissement.

« Pour combattre l'infertilité, il ne suffit pas de drainer et d'assainir, il faut en outre des engrais, des amendements; or, on ne trouve la marne ou la chaux qu'aux lisières de la Sologne et les distances à franchir sont considérables; de là nécessité de voies de communications économiques et nombreuses. »

Dès le commencement des travaux, on se préoccupa de faire curer les rivières et d'ouvrir des canaux. Le seul canal exécuté est celui de la Sauldre, de Blancafort à la Motte-Beuvron, d'une longueur totale de 43 kilomètres, ayant coûté 4120000 francs. Ce canal doit se raccorder avec le chemin de fer du Centre à la Motte-Beuvron.

Les autres voies navigables projetées primitivement n'ont pas été exécutées, mais remplacées par des voies de terre spéciales, désignées sous le nom de routes agricoles.

De 1849 à 1869, la dépense effectuée par l'État pour l'amélioration de la Sologne s'est élevée à 12 millions de francs.

Les progrès agricoles réalisés sont saisissants partout où les nouvelles voies ont permis d'apporter les amendements et d'écouler les récoltes, partout où le curage des rivières a rendu les marécages à la culture et transformé l'aspect des prairies naturelles.

Le produit des impôts de toute nature s'est accru dans la Sologne beaucoup plus rapidement que dans les contrées voisines, le froment a remplacé le seigle, des habitations salubres se sont élevées de toutes parts, la constitution physique de l'habitant s'est améliorée : l'État a fait une œuvre utile, et en même temps a placé ses fonds à un intérêt rémunérateur.

ASSAINISSEMENT DE LA PLAINE DE L'HABRA (ALGÉRIE).

La plaine de l'Habra se trouve en Algérie, dans la province d'Oran, sur le bord de la Méditerranée. Elle a été mise en valeur par une compagnie française, et M. l'ingénieur Pochet a rendu compte des travaux exécutés à cet effet; nous aurons lieu de les décrire lorsque nous traiterons des irrigations. Nous ne voulons parler ici que des procédés mis en œuvre pour l'assainissement des parties marécageuses de cette plaine.

Dans la partie la plus éloignée de la mer, sa pente est de 3 à 4 mètres par kilomètre; mais, à mesure qu'on se rapproche de la Méditerranée, la pente diminue et finit par être nulle. Si l'on joint à cela que les cours d'eau ont un

débit considérable dans la saison pluvieuse et sont à sec en été, on comprend sans peine que leur embouchure s'est rapidement encombrée, que leur lit a disparu, et que les eaux répandues sur toute la plaine l'ont transformée en marécage. Ce marécage, connu sous le nom de marais de la Macta, devenait en été le siége d'une évaporation abondante et pestilentielle; la contrée était redoutée pour ses fièvres.

La première chose à faire était d'assurer en tout temps l'écoulement des eaux des rivières vers la mer; c'est ce qu'on fit en créant pour l'Habra, le Sig et le Tinn des lits artificiels, comprenant un lit mineur, capable de livrer passage au débit ordinaire, et un lit majeur formé par deux digues parallèles capables de contenir les crues les plus fortes.

Du même coup, ces digues mettaient à l'abri des inondations les terres riveraines.

Ces terres ainsi soustraites pour l'avenir à l'invasion des eaux ont été assainies par des plantations d'eucalyptus qui ont donné d'excellents résultats.

Influence des plantations sur l'assainissement. — D'une manière générale, les plantations purifient l'atmosphère et ne sauraient être trop propagées dans les endroits insalubres, à moins qu'elles ne constituent un rideau empêchant une surface marécageuse d'être balayée par les vents.

Par leurs feuilles, les arbres absorbent l'acide carbonique et exhalent de l'oxygène; l'évaporation abondante qu'ils éprouvent, par les parties vertes, dessèche le sol et rend à l'atmosphère une vapeur d'eau purifiée par son passage à travers l'organisme végétal et débarrassée des gaz putrides.

Il est de fait, dit M. l'ingénieur Maitrot de Varenne, que la campagne de Rome, les marennes toscanes, le plateau central de la Sicile, la Camargue, la Dombes, la Bresse, la Sologne, et une foule d'autres territoires ont perdu leur ancienne salubrité en perdant les bois qui les couvraient en partie. D'un autre côté, on rencontre des pays où se trouvent des marais, des eaux stagnantes et des plaines incultes, mais que des bois épais garantissent de toute insalubrité. Lors du siége de Zaatcha, dans le petit désert africain, le camp français, placé d'abord en dehors du bois de palmiers entourant le village, fut transporté, malgré les balles des indigènes, dans l'intérieur du bois, pour soustraire nos soldats à l'action meurtrière des fièvres. Les marais mouillés de la Vendée n'ont aucune action nuisible, parce que la plupart des canaux sont recouverts par des arbustes, et que même les roseaux et les rouches qui garnissent certaines parties font l'office de plantations.

De l'eucalyptus. — En Algérie, avons-nous dit, l'eucalyptus a fait merveille comme moyen d'assainissement. A ce sujet, nous reproduirons les lignes suivantes de M. Pochet :

« L'Algérie doit à M. Ramel, d'Alger, la conquête d'un arbre précieux, l'eucalyptus globulus, importé d'Australie, il y a une douzaine d'années environ.

« Les caractères spécifiques de cet arbre remarquable sont les suivants : 1° Sa croissance est d'une telle rapidité qu'elle tient du prodige. En quinze mois nous avons vu des arbres acquérir une hauteur de tige de 6 mètres et un diamètre de 10 centimètres au collet. En cinq ou six ans, l'eucalyptus arrive à un diamètre de 30 à 35 centimètres. 2° Malgré cette croissance rapide, son bois est extrêmement dur, sa tige est droite, et tout porte à croire qu'il donnera d'excellents résultats dans les constructions, et surtout quand on l'emploiera comme traverse de chemin de fer. 3° Sa feuille distille une huile essentielle d'une odeur fortement aromatique. Employée en infusion, elle combat la fièvre

paludéenne avec tant d'efficacité que l'eucalyptus globulus pourrait passer pour un succédané du quinquina. Les plantations forestières d'eucalyptus ont déjà donné, au point de vue de l'assainissement de l'atmosphère, des résultats surprenants.

« Nous tenons de M. Saulière, propriétaire aux environs d'Alger, que la plantation en eucalyptus globulus d'une superficie de 4 hectares a suffi pour assainir complétement une usine à eau, tellement insalubre, que les fermiers ne pouvaient l'habiter. Aujourd'hui, la fièvre est inconnue autour de l'usine.

« L'eucalyptus est un arbre des zones tempérées. Il craint la gelée et le vent. Nous ne pensons pas qu'il puisse être acclimaté d'une façon convenable en France, excepté dans les stations hivernales de la Méditerranée. »

DESSÉCHEMENT DES MARAIS SOUMIS A L'INFLUENCE DES MARÉES.

Les entreprises de desséchement les plus importantes et les plus intéressantes ont pour objet les marais situés sur le bord de l'Océan ou le long des rivières soumises à l'influence des marées.

Plusieurs cas peuvent se présenter :

1° La surface du marais, couverte à haute mer, émerge complétement à basse mer ; dans ce cas, il suffit de la protéger contre la haute mer, par une digue d'une épaisseur convenablement calculée ; l'eau salée ne pénètre plus sur le marais, et il ne reste à expulser que l'eau précédemment accumulée, ainsi que l'eau pluviale ; on y arrive en ménageant dans la digue un certain nombre de vannes ou de portes d'écluse, que l'on ouvre dès que le niveau de la mer est inférieur à celui des eaux du marais ; l'écoulement commence alors et s'accélère à mesure que la mer baisse, quand elle remonte on ferme les vannes ou les portes d'écluse, et on attend la basse mer suivante pour recommencer l'opération.

2° Le sol du marais peut se trouver à un niveau inférieur à la basse mer. Dans ce cas, on construit encore une digue d'enceinte ; toute la tranche d'eau qui se trouve au-dessus du niveau des basses mers s'écoule par le jeu des marées, ainsi que nous l'avons expliqué dans le premier cas. Quant au volume d'eau qui existe au-dessous du niveau des basses mers, il est évidemment nécessaire de recourir à des machines élévatoires pour le jeter dans la mer. Lorsque le premier desséchement a été effectué et que le marais est en culture, il n'y a plus qu'à maintenir la nappe alimentée par les sources et la pluie, à un niveau assez bas, pour qu'elle ne nuise pas à la végétation ; il faut donc conserver des machines élévatoires en fonctionnement continuel, machines dont la puissance doit pouvoir varier entre des limites assez étendues pour parer à toutes les éventualités.

Les exemples ci-après feront comprendre et expliqueront en détail la manière dont on procède suivant les cas.

WATRINGUES DE DUNKERQUE.

Les watringues sont des terrains fertiles, situés dans l'arrondissement de Dunkerque sur les bords de la Manche.

C'est une plaine, légèrement inclinée du sud au nord, et située tout entière au-dessous des hautes mers; elle est limitée du côté de la mer par les dunes du littoral et entourée par les digues des canaux, de sorte que, si on l'abandonnait à elle-même, elle ne tarderait pas à se transformer en marécage.

Au contraire, en la traversant par des canaux suffisamment profonds et suffisamment larges, débouchant dans la mer au moyen d'écluses qui s'ouvrent à marée basse, on arrive à maintenir la nappe d'eau au niveau qui convient pour une bonne végétation.

Le réseau des canaux comprend des artères principales, telles que le canal de Dunkerque à Furnes; ces canaux, qui sont navigables, reçoivent le tribut des fossés principaux de desséchement, lesquels portent le nom de watergands; sur ces fossés principaux se ramifient les fossés secondaires qui vont soutirer en tous les points de la surface l'eau dont la terre est imprégnée.

Les pertuis pour l'écoulement à la mer sont de diverses grandeurs, suivant le volume d'eau auquel ils doivent donner passage; il y a des écluses avec des portes busquées, mais il y a aussi de simples aqueducs avec des vannes et des clapets, que l'on ferme à la haute mer et que l'on ouvre à basse mer. Les aqueducs sont même, sur certains points, remplacés par des buses en bois.

La surface des watringues est de 30 000 hectares répartis entre 1500 propriétaires; la cotisation annuelle varie, suivant les sections, de 2 fr. 50 c. à 4 fr. 60 c. par hectare. La dépense totale est de 135,000 francs par an; elle s'applique aux faucardements, aux curages, à l'entretien des digues et ouvrages, ainsi qu'à l'entretien des chemins qui desservent la surface.

Les arrondissements de Boulogne et de Saint-Omer, dans le Pas-de-Calais, renferment 40,000 hectares de watringues, dont l'assainissement a été obtenu au moyen de canaux et de fossés que l'on entretient avec soin.

Écluses avec portes. Clapets. — Un des ponts éclusés que l'on cite le plus souvent est celui du Grand-Vey sur la Vire. Le projet, dont le modèle existe à l'École des ponts et chaussées, avait été dressé en 1774 par M. Lefèvre, ingénieur de la généralité de Caen.

« Cet ouvrage avait un double but : il devait, au moyen de portes de flot, s'opposer à l'introduction des eaux de la mer montante en amont du passage du Vey, près d'Isigny; il devait, à mer basse, laisser écouler les eaux douces et assécher la vallée. Cette destination et l'obligation de disposer les choses de façon que les portes de flot pussent se fermer toutes seules à la mer montante et s'ouvrir de même à mer basse, ne permettaient de donner qu'un faible débouché aux neuf arches pourvues de portes; on les avait prévues à 6 mètres, avec piles de 3 mètres du côté de la mer. Du côté des terres, les neuf arches étaient réduites à trois, de 24 mètres d'ouverture, fortement surbaissées et avec têtes en cornes de vache.

Les portes du pont de Vey ont été enlevées depuis; elles nuisaient à la navigation et ne permettaient pas au mouvement de flux et de reflux d'entretenir le chenal du port d'Isigny.

Plusieurs ouvrages analogues subsistent encore sur les côtes de Normandie.

Les figures 3 à 6 de la planche I, représentent une grande écluse de dessèchement construite en 1807 près du sas de Gand; elle comprend du côté de la mer deux paires de portes busquées, et du côté des terres un système de ventelles. Grâce à ces trois systèmes de fermeture, on est à l'abri de tous les dangers d'inondation.

La figure 7 de la planche I, représente une buse (du hollandais *bus*), ou aqueduc en planches, fermé par un clapet en bois du côté de la mer. Le clapet en bois tourne autour de son arête supérieure au moyen d'une charnière horizontale. Lorsque la mer monte, la pression applique le clapet sur son siége, et l'aqueduc est fermé; lorsque le niveau de la mer est inférieur à celui de l'eau dans les canaux de dessèchement, c'est la pression intérieure qui l'emporte ; le clapet est soulevé et les eaux du marais s'écoulent vers la mer. Il va sans dire que la tête des buses en bois doit être soigneusement protégée contre les affouillements, et qu'en arrière du clapet on doit placer une vanne que l'on ferme lors des grandes marées d'équinoxe et qui remplace le clapet en cas d'avarie.

Les clapets automatiques ont du reste l'inconvénient de pouvoir rester ouverts par l'interposition de quelque corps flottant ou simplement par ensablement ; aussi ne conviennent-ils qu'aux aqueducs peu importants, et, en bien des cas, leur préfère-t'on un vannage, lorsqu'on peut facilement en assurer la manœuvre.

Clapets en fonte du marais de Calvi. — Nous trouvons dans les *Annales des ponts et chaussées* de 1876 la description d'un clapet en fonte que M. l'ingénieur Doniol a fait établir sur l'émissaire du marais de Calvi.

« L'amplitude maxima des marées de la Méditerranée sur les côtes de la Corse, dit M. Doniol, est d'environ $0^m,70$. Ces marées ne sont pas régulières; elles sont influencées par la pression atmosphérique et surtout par l'état des vents. Elles mettent souvent un temps assez long à se produire. Il résulte de cette dernière circonstance que, si le marais est peu étendu et s'il n'y a pas contact parfait du clapet sur son siége, l'équilibre du niveau s'établit insensiblement entre la mer et le marais; le clapet reste flottant et n'empêche pas l'émissaire du marais d'être complétement envahi par la marée haute. C'est ce qui arrive avec les clapets en bois, qui se trouvent bientôt gondolés sous l'influence de l'humidité et de la chaleur. La rigidité étant une condition essentielle, il m'a paru convenable d'essayer l'emploi d'un clapet en métal.

« J'ai cherché à faire remplir à ce clapet automobile trois conditions principales : 1° fermer hermétiquement la communication, quand le niveau des eaux du marais est moins élevé que celui de la mer ; 2° obéir à une faible pression et permettre l'écoulement dès que le niveau des eaux est plus élevé du côté du marais ; 3° être construit assez solidement pour résister à la malveillance des passants et aux causes accidentelles d'avaries. »

Représenté par les figures 8 à 10 pl. I, le clapet de Calvi a $0^m,60$ sur $0^m,60$ de débouché ; pour lui permettre de s'ouvrir sous une faible pression, on a dédoublé le clapet en deux clapets superposés, suspendus chacun à un axe horizontal de rotation. Les tourillons venus de fonte tournent sur des coussinets ménagés dans des consoles en cuivre; les consoles sont un peu en avant de l'arête supérieure des clapets ,afin que la rotation ne s'effectue jamais sur une arête. Chaque clapet repose sur son siége par une portée plane, bien dressée, de 25 millimètres de largeur. La sensibilité du clapet dépend de la distance qui

existe entre la verticale passant par l'axe de rotation et la verticale passant par le centre de gravité; cette distance a été réduite à $0^m,003$, de telle façon que le clapet s'ouvre pour une dénivellation de $0^m,04$ entre le marais et la mer. Du reste, on pourrait augmenter la sensibilité en munissant les clapets de contre-poids, et l'effort à exercer se réduirait à celui qui est nécessaire pour vaincre le frottement des tourillons.

Pour maintenir la sensibilité du clapet de Calvi et en assurer la fermeture hermétique, il faut nettoyer de temps en temps les faces de contact, ainsi que les consoles en cuivre et les coussinets.

Le poids de chaque clapet mobile est de 39 kilogrammes, et le poids de tout l'appareil, 147 kilogrammes.

L'inclinaison du clapet, c'est-à-dire la distance x entre la verticale de l'axe de rotation et la verticale du centre de gravité, dépend de la sensibilité qu'on veut donner au clapet; veut-on qu'il se lève pour une dénivellation h, en désignant par P le poids du clapet, par A sa largeur, par L la hauteur de l'axe de rotation au-dessus du clapet, on reconnaît que :

Le moment de la résistance est (Px)
Le moment de la puissance est $\frac{1000Ah^2}{2}\left(L-\frac{2}{3}h\right)$.

Si on égale ces deux quantités, que l'on remplace P, A et L par les nombres 39, 0,60 et 0,335, on trouve :

$$x = 0,0038.$$

Clapet en tôle de la Basse-Loire. — Les figures 11 à 13 pl. I, représentent le clapet en tôle destiné à fermer, lors des crues, les aqueducs établis dans les levées de la Basse-Loire. Avec les anciens clapets en bois, le bois gauchissait bien vite, le clapet ne s'appliquait plus sur son siége, l'eau du fleuve entrait dans le val et y déterminait une inondation. Aussi avait-on remplacé presque tous les clapets par des bondes dont la clef se trouvait chez le maire de la commune; mais la bonde n'était pas toujours manœuvrée à temps et il en résultait encore des inondations.

Ces inconvénients ont disparu depuis qu'on a eu recours aux clapets en tôle à charnière brisée, dont la disposition ingénieuse est due à M. F. Harmand, conducteur des ponts et chaussées.

La charnière brisée permet à la feuille de tôle de venir s'appliquer sur l'orifice de l'aqueduc, lors même que l'un des nœuds jouerait difficilement.

On voit à la partie inférieure du clapet une poignée qui sert à soulever le clapet au moyen d'une gaffe, pour le débarrasser des branchages qui pourraient en arrêter le fonctionnement.

Un clapet de ce genre coûte 50 francs tout posé et ajusté, à raison de 1 fr. 50 c. le kilogramme.

POLDERS DE LA HOLLANDE

Dessèchements par machines.

Le long des côtes, et sur les parties inférieures des fleuves de la mer du Nord et de la Manche, en Allemagne, en Hollande, en Belgique et en France, on rencontre de vastes plaines formées d'une bonne et fertile couche d'argile; cette argile repose sur une épaisseur de plusieurs mètres de tourbe, et au-dessous on trouve presque toujours du sable.

Ces plaines, qui s'appellent *marches* en Allemagne, et *polders* dans la Hollande et la Belgique, sont souvent à un niveau inférieur à celui de la mer.

Elles ont été endiguées et assainies par des fossés d'écoulement; en certains cas, lorsqu'elles se trouvaient inférieures aux basses mers, il a fallu recourir aux machines d'épuisement.

La dénomination de *polder* appartient donc aux terrains endigués qui ont été conquis sur la mer ou sur les fleuves près de leur embouchure, et mis à l'abri des inondations par des digues élevées au-dessus des plus hautes mers.

Nous ferons ici l'historique des polders les plus connus.

POLDER DU ZUID-PLAS.

Les lacs ou mers intérieures de la Hollande sont des masses d'eau en communication avec les canaux et fleuves voisins; ces masses d'eau ont en général 4 à 5 mètres de profondeur, quelquefois plus. — Lorsque les digues n'existaient pas ou étaient insuffisantes, les eaux de la mer ont envahi les dépressions et ces dépressions se sont accrues sous l'influence des courants; première cause de formation des polders, cause à laquelle on doit la mer de Harlem et la plupart des lacs de la Hollande du Nord desséchés aux seizième et dix-septième siècles. La seconde cause de la formation des polders tient à l'exploitation de la tourbe, combustible autrefois bien précieux dans un pays non boisé où les houilles n'arrivaient pas. Nous avons dit que sous l'argile de la surface on trouvait plusieurs mètres de tourbe; on extrayait cette tourbe, on la séchait et on la vendait en briquettes. Les eaux envahissaient les excavations, qui peu à peu s'agrandissaient par l'entraînement des terres voisines.

Au commencement de ce siècle on avait desséché et rendu à la culture 70 000 hectares de mers intérieures.

Le Zuid-Plas, dont le plan est donné par la figure 1 planche V, était un lac de 4600 hectares qu'on a desséché dans les premières années du dix-neuvième siècle.

Dans une opération de ce genre, il faut rechercher d'abord la nature du sol à découvrir et s'assurer qu'il est fertile et propre à la culture; on risquerait sans cela de faire en pure perte une coûteuse opération.

On relève ensuite bien exactement le plan et les profils verticaux du lac, afin de reconnaître si le fond en est suffisamment uni, et si l'écoulement est possible.

Tout autour du lac, on ouvre un canal d'enceinte, canal navigable, capable de recevoir toutes les eaux et de les conduire jusqu'aux écluses percées soit dans les digues des bords de la mer, soit dans celles des fleuves à marée. La figure 2 planche V, donne le profil en travers du canal d'enceinte du Zuid-Plas.

A ce canal est juxtaposée la digue d'enceinte qui empêche l'arrivée dans le polder de toutes les eaux extérieures ; cette digue est la partie essentielle du desséchement, c'est d'elle que dépendent le succès et l'avenir de l'entreprise.

Si elle n'est pas assez forte et si elle donne lieu à des filtrations, il est à craindre qu'elle ne vienne à se rompre : les eaux feraient alors irruption dans le polder qu il faudrait assécher à nouveau après avoir à grands frais réparé les digues.

La construction de digues puissantes est bien difficile dans des pays marécageux ; on n'a à sa disposition que des terres et des fascines, et c'est avec ces deux éléments qui forment comme un feutrage sur le sol et qui se prêtent à toutes les déformations produites par les tassements, c'est avec ces deux éléments que les Hollandais ont conquis sur les eaux leurs provinces les plus fertiles. La figure 3 de la planche V donne la coupe en travers de la digue du Zuid-Plas, massif de terre protégé par deux risbermes en fascines. Nous expliquerons plus loin avec quelques détails l'exécution de ce genre d'ouvrage.

Quand la digue d'enceinte est achevée, il faut enlever avec des machines la masse d'eau qui se trouve à l'intérieur.

Dans les anciens polders, les machines d'épuisement employées à cet effet étaient les roues élévatoires, et le plus souvent, la vis d'Archimède ou vis hollandaise ; le moteur était le moulin à vent. Ce sont là des appareils de construction et d'entretien faciles, ne se dérangeant guère ; ils conviennent bien à des entreprises de ce genre, conduites économiquement. Pour aller vite ou pour élever de grands volumes d'eau à plusieurs mètres de hauteur, il vaudrait mieux recourir à des machines à vapeur. C'est ce qui a été fait pour la mer de Harlem.

Les anciens moulins à vent de la Hollande n'élevaient l'eau qu'à $1^{m},50$ de hauteur, de sorte que si la dénivellation à racheter était de 3 mètres, de $4^{m},50$ ou de 6 mètres, il fallait deux, trois ou quatre étages de moulins à vent actionnant chacun leur vis d'Archimède ou leur roue de côté.

Un moulin fort et bien construit suffisait à maintenir en bon état d'assèchement une surface de 400 à 500 hectares. Lorsque la masse d'eau première est enlevée, ce qui exige avec les moulins à vent un temps relativement considérable, les mêmes moulins servent à l'entretien du polder et accomplissent cette besogne d'une manière économique.

Il est clair que les moulins et machines élévatoires sont placés aux points les plus déprimés, puisque c'est là que les eaux tendent naturellement à s'amasser. Les machines sont du reste distribuées sur le pourtour de la manière la plus favorable, afin que l'eau fasse le moins de chemin possible et soit élevée à la moindre hauteur possible.

Avec des digues bien faites, un desséchement, opéré à l'aide de moulins à vent, se fait en trois ou quatre ans.

Lorsque le sol apparait, on divise la surface en longs rectangles au moyen de canaux et de rigoles convenablement calculés. C'est une grosse dépense, puisque ces artères occupent environ le dixième de la surface totale.

Les terres extraites des canaux servent à établir à travers le polder des chaus-

sées, dont la direction est choisie de manière à relier convenablement le nouveau sol avec les villes et villages voisins.

Le desséchement du Zuid-Plas s'est opéré à l'aide de quatre étages de moulins à vent et de deux machines à vapeur; la hauteur d'élévation des eaux dépassait 6 mètres. — L'opération a coûté 3 millions de florins.

Lorsque les terres conquises peuvent être livrées à la culture, on commence, afin de les y rendre propres, par y semer du colza; puis on les vend et un syndicat s'établit entre les propriétaires pour la direction et l'entretien du polder.

. L'établissement des habitations dans le polder exige de grandes précautions. Si le desséchement a une grande étendue, on construit des maisons le long des chemins et de la digue d'enceinte. Si, au contraire, le desséchement a peu d'étendue, il est préférable de placer les maisons le long de la digue d'enceinte seulement, dont la position est plus élevée et par conséquent plus saine; en même temps, les récoltes peuvent être promptement et immédiatement transportées le long du canal d'enceinte.

Tous les grands mouvements de terre et tous les assèchements exhalent pendant les premiers temps des miasmes putrides et engendrent des fièvres; le climat humide et froid de la Hollande s'oppose à une fermentation active, et les travaux du genre de ceux que nous venons de décrire n'y présentent pas les inconvénients sanitaires qu'ils pourraient avoir sous d'autres climats.

DESSÈCHEMENT DU LAC DE HARLEM.

Le lac ou mer intérieure de Harlem, desséché vers 1840, est le type des polders de la Hollande. M. Gevers d'Endegeest a rendu compte de ce grand travail dans deux mémoires publiés à la Haye et à Amsterdam, en 1849 et en 1854; ce sont ces mémoires que nous allons analyser ici.

Ce sont les digues qui ont rendu habitable le sol de la Hollande et l'ont mis à l'abri des crues des rivières et des hautes marées. Le pays se trouve divisé par ces digues en districts plus ou moins étendus, et chaque district est gouverné par des administrations régulières analogues à nos syndicats.

L'enceinte d'une de ces administrations est composée de digues puissantes, opposées soit à la mer, soit aux fleuves, et destinées à empêcher l'introduction des *eaux extérieures*. En dedans de cette enceinte, il faut pourvoir à l'écoulement des *eaux intérieures* provenant des pluies, des sources ou des filtrations; si ces eaux intérieures n'avaient point d'issue, l'évaporation ne suffirait pas à les enlever et elles transformeraient le polder en marécage.

Chaque digue d'enceinte a donc dû être munie d'une ou de plusieurs écluses, pour laisser écouler ces eaux intérieures dans les eaux extérieures, toutes les fois que les reflux ou les vents de la terre abaissent suffisamment le niveau de ces dernières. Souvent ces écluses d'écoulement servent en même temps à la navigation.

La figure 1 planche VI, est un plan général de la mer de Harlem; l'écluse de Sparendam, près Harlem, est ouverte à la navigation; l'écluse de Mulfwegen, mi-chemin entre Harlem et Amsterdam, ne sert qu'à l'écoulement.

Lorsque les écluses débouchent dans un courant d'eau douce, il arrive pendant les grandes sécheresses qu'on renverse leur rôle; elles servent alors à admettre dans le polder des eaux douces pour l'arrosage.

Chaque district a son bassin intérieur, consistant soit en lacs et étangs, soit en canaux et fossés; ce bassin emmagasine les eaux intérieures et leur sert de régulateur en même temps qu'il constitue la voie de navigation par laquelle s'effectuent tous les transports.

Le bassin reçoit d'une part les eaux qui s'écoulent naturellement des terrains anciens, c'est-à-dire de ceux qui sont plus élevés que lui; il reçoit d'autre part les eaux des polders ou terrains desséchés situés en contre-bas; ces eaux sont élevées par des moulins ou par des machines à vapeur.

Le bassin est, comme nous l'avons dit, en communication avec les eaux extérieures par des écluses que l'on ouvre toutes les fois que, par le jeu des marées ou des crues, une dénivellation s'établit entre le bassin et les eaux extérieures.

Les grands bassins ont un avantage sérieux; ils peuvent emmagasiner beaucoup d'eau sans que leur niveau s'élève outre mesure et sans qu'on soit forcé d'interrompre le fonctionnement des machines d'épuisement. En été, ils gardent une provision suffisante pour l'arrosage du sol.

Tout polder possède des vannes destinées à admettre au besoin l'eau du bassin; il ne faut que peu de sécheresse et de chaleur pour faire naître ce besoin. Ces terrains si bas, en partie marécageux pendant l'hiver, souffrent très-vite du manque de pluie en été; l'infiltration et les sources, rares, d'ailleurs, ne leur donnent pas alors assez d'humidité.

Un bassin peu étendu se vide facilement, mais son influence régulatrice est faible; pendant l'humidité, il s'emplit vite et il arrive qu'on est forcé d'arrêter les machines d'épuisement et de laisser le polder inondé. En été, l'irrigation n'est plus assurée, à moins que le bassin ne communique avec un courant d'eau douce.

Les avantages respectifs des grands et des petits bassins dépendent donc essentiellement des circonstances locales. Tout bassin peut même être inutile, si la disposition des lieux est telle que l'écoulement des eaux intérieures vers les eaux extérieures soit toujours possible, et s'il est facile de faire entrer les eaux douces en été. Le bassin n'est, en effet, qu'un intermédiaire entre le polder et les eaux extérieures; on peut, dans certains cas, le réduire aux voies de navigation et aux fossés d'égouttement.

Les bassins sont formés souvent avec les tourbières précédemment exploitées; sous la tourbe se trouve en général un bon terrain, et la tourbe est un produit de grand rapport. L'administration ne permet l'exploitation de tourbières nouvelles qu'autant que le concessionnaire verse au Trésor les fonds nécessaires pour assurer le payement de l'impôt foncier et l'établissement du polder qui devra être créé après l'enlèvement de la tourbe.

Cette double transformation, d'abord de terre en eau, ensuite d'eau en polders fertiles est donc une excellente opération au point de vue économique.

On conçoit que, pour la création et la conservation des polders, le succès dépend surtout des digues. Quant le vent enfile un canal ou un lac dans sa longueur, il détermine des dénivellations dans la surface des eaux, dénivellations qui peuvent atteindre un mètre sur la longueur du lac de Harlem; lorsque la pente est dans le sens de l'écoulement, il n'y a pas d'inconvénient; mais, lorsqu'elle est en sens contraire, les eaux refoulées viennent battre les digues, quelquefois même elles les surmontent. Les grandes marées, lorsque le vent leur vient en aide, livrent de rudes assauts aux digues du littoral.

Ces digues doivent dépasser les plus hautes marées et celles qui longent les rivières doivent dépasser les plus hautes crues.

Pour établir une digue sur un sol ferme, on commence par bêcher le sol, puis on constitue la digue avec des terres rapportées. — Si le sol est mou, on ne touche pas à la surface et on la recouvre de fascines sur lesquelles on élève le massif de terre. — Enfin, si malgré le fascinage la digue s'affaisse, il faut enlever toute la terre molle et la tourbe à l'emplacement jusqu'à ce qu'on arrive au fond solide, ou bien il faut recharger le remblai au fur et à mesure qu'il s'affaisse, ainsi que l'on a fait pour les chemins de fer établis sur les terrains vaseux de la Bretagne ou du Nord.

Les digues en terre se relient généralement bien au sol de la Hollande; sur le bord des rivières, elles reposent quelquefois sur des couches de sable qui donnent lieu à d'abondantes infiltrations. — Le corps de la digue se couvre spontanément d'herbe et devient comme une prairie propre au pâturage où à la récolte du foin.

Lorsqu'il s'agit d'établir une digue dans l'eau, on en détermine l'emplacement par des perches; on construit avec des fascines un grand radeau qu'on amène à l'emplacement voulu et que l'on coule en le chargeant de terre glaise; sur cette première assise on en échoue une seconde pareille, mais un peu moins large, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on soit sorti de l'eau.

Les digues menacées par les vagues sont protégées par divers moyens dont nous donnerons plus loin la description.

Parmi les administrations ou districts hydrauliques de la Hollande, la plus considérable était le Rhinland dont la mer de Harlem faisait partie. Le Rhinland tirait son nom de cette branche du Rhin, figure 1 planche VI, qui le traverse et qui se jetait à la mer à Katwyck avant que les dunes ne vinssent au huitième siècle ensabler son embouchure.

Le Rhinland comprend 123,500 hectares; un quart de cette superficie est terrain naturel, le reste serait couvert d'eau si on ne l'avait transformé en polders.

La mer de Harlem servait de bassin à la superficie; on s'est proposé d'en dessécher une surface de 18,000 hectares, et de réduire le bassin du Rhinland à 48,000 hectares.

L'écoulement du Rhinland se fait dans l'Y par les écluses de Sparendam, de Mulfwegen et d'Amsterdam, dans la mer du Nord par l'écluse de Katwyck; c'est cette dernière qui, construite en 1808 à travers les dunes, a assuré en tout temps l'écoulement des eaux intérieures.

Le lac de Harlem était dans le nord du Rhinland; l'espace qu'il occupait avait été jadis un pays habité; une carte de 1531 ne mentionne à sa place que quatre petits lacs; deux chemins traversaient l'étendue actuelle et trois villages y florissaient. En 1591 un des villages avait disparu, en 1647 les deux autres avaient le même sort et le lac qui n'occupait en l'an 1500 que 6000 hectares s'agrandissait sans cesse de manière à dépasser 18,000 hectares. Le sol ne se compose, en effet, que de parcelles molles et fines que les eaux délayent et entraînent à la mer où elles se déposent en atterrissements.

Le fond du lac était en général uni et situé à 4 mètres de profondeur sous la surface ordinaire de l'eau; ce fond était formé d'une terre argileuse fertile.

Dès 1617 une concession pour le dessèchement du lac de Harlem fut demandée aux états de Hollande; en 1653 un constructeur de moulins nommé Leeghwater présenta un projet de dessèchement convenablement combiné. — Ce projet fut repris maintes et maintes fois. — En 1836 un vent d'ouest furieux chassa avec violence les eaux du lac sur Amsterdam; elles se jetèrent à travers les polders

et par-dessus les routes et les digues jusque sous les murs de la capitale ; quelque temps après, par un vent d'est, le lac, poussé vers Leyde, faillit inonder cette dernière ville.

On sentit la nécessité d'entreprendre le desséchement de cette mer intérieure si dangereuse, et il fut décidé par une loi de mars 1839. L'exécution était confiée à une commission de onze membres qui arrêta les bases suivantes :

Dessécher le lac entier, soit 18,100 hectares, à la profondeur moyenne de 4 mètres, ce qui fait 724 millions de mètres cubes d'eau ;

Isoler le lac au moyen d'une forte digue de périmètre, établie soit sur le sol, soit dans l'eau, avec un développement de 5900 mètres ;

Creuser autour et le long de la digue, figure 2 planche VI, un large canal de dérivation communiquant avec tous les canaux, destiné à conduire l'eau vers les écluses et remplaçant la navigation sur le lac, établir sur ce canal des ponts permettant d'accéder aux avenues du polder ;

Déverser l'eau du lac dans le bassin extérieur ainsi formé, et pourvoir à l'écoulement de ce bassin, 1° en améliorant le canal de dérivation de Katwyck, 2° en approfondisssant le lit du Spaarne, 3° en établissant à Sparendam une machine à vapeur d'au moins 180 chevaux, pour déverser les eaux du bassin dans la mer ;

Pourvoir pendant les sécheresses à l'alimentation du bassin amoindri, et faciliter la navigation en compensation des détours qu'on lui imposait ;

Substituer pour le desséchement la force de la vapeur à celle du vent.

Ce dernier point ne fut pas admis dans le programme sans contestation ; mais on prouva que, pour dessécher le lac en 4 ans et l'entretenir ensuite, il fallait deux étages de 57 grands moulins, soit 114 moulins, travaillant 60 jours par an ; avec eux le desséchement coûtait 3,700,000 florins ; avec des pompes à simple effet mues par la vapeur, il ne devait coûter que 1,200,000 florins et pouvait s'effectuer en 2 ans. Pendant la période d'entretien, les machines à vapeur étaient plus économiques aussi que les moulins à vent et permettaient de parer à toutes les éventualités.

On adopta des machines de Cornouailles, dont on connaissait déjà, à cette époque, la marche régulière et l'excellent rendement.

Trois machines furent établies, qui épuisèrent le lac en 39 mois, du 1er avril 1849 au 1er juillet 1852 ; elles enlevèrent 830 millions de mètres cubes d'eau.

Leur marche n'était pas continue à cause du manque d'eau qui se produisait fréquemment aux points d'épuisement. Il est dans tout desséchement fort difficile de faire arriver à temps les eaux aux moulins et aux machines ; cet inconvénient fut très-marqué au lac de Harlem, parce que les points d'épuisement se bornaient à trois, et qu'une grande distance les séparait du centre d'où devaient arriver les eaux. Les grands canaux de conduite vers les puisards des machines ne purent être terminés qu'après que le lac se fut trouvé à sec en juillet 1852.

Il semble que ces canaux de conduite eussent pu être ébauchés avec des dragues avant la fin du desséchement, et par ce moyen on aurait gagné quelques mois.

Le desséchement achevé, il fallait s'occuper du lotissement et des canaux et fossés intérieurs ; le plan primitif était basé sur une division par lots de 5 hectares chacun.

La surface du polder est de 18,154 hectares.

La surface prévue des grands canaux de longueur et de traverse était de.	71,44 hectares.
Celle des canaux de longueur.	68,64 —
Celle des canaux de traverse.	39,36 —
Celle des fossés.	1134,00 —
Total. . . .	1313,43 hectares.

La surface du bassin intérieur atteignait donc le $\frac{1}{14}$ de la surface totale; dans les anciens polders, desservis par les moulins à vent, dont la marche est moins assurée, nous avons vu que le rapport s'élevait à $\frac{1}{10}$. On comprend sans peine les motifs de cette différence.

Le lotissement d'un polder n'est pas une opération aussi simple qu'on le croirait au premier abord.

En divisant par grands lots de 10 ou 20 hectares, on économisait des déblais de fossés et on augmentait la surface à vendre, mais on risquait d'effrayer les acheteurs et de nuire à l'agriculture.

Cependant on se décida pour les grands lots de 10 ou 20 hectares, et il n'en résulta point d'inconvénients.

La dépense totale à la fin de 1852 s'élevait à environ 10 millions de florins, soit à 21 millions de francs pour 18,000 hectares, ce qui fait 1166 francs par hectare desséché.

Les dépenses finales s'élevèrent à 29 millions; on tira 20 millions de la vente des terres conquises, qui valent aujourd'hui 2000 francs l'hectare; la préservation des trois villes, Leyde, Amsterdam et Harlem, et l'accroissement énorme de la richesse publique ne coûtèrent donc que 8 millions.

A la suite d'un voyage fait en 1860 au lac de Harlem, M. Mille, aujourd'hui inspecteur général des ponts et chaussées, en faisait le tableau suivant :

« *Une visite au lac de Harlem.* — Une visite au lac de Harlem est facile; en une demi-heure on est transporté de la ville au canal de ceinture, belle nappe d'eau de 40 mètres, sur laquelle flottent paisiblement les galiotes hollandaises. Un bac fait la traversée, et, une fois au delà des digues, on éprouve une surprise qui va croissant. On roule sur des empierrements de gravier côte à côte des canaux intérieurs, où l'eau agitée et propre se tient à $1^m,50$ en contre-bas des berges. A droite et à gauche les prairies alternent avec les cultures, tandis qu'à tous les coins de l'horizon, on aperçoit des maisons ou des fermes de la Nord-Hollande, espèces de parapluies en tuiles rouges et de forme carrée, où tout tient sous le même toit, logement, étables, écuries et grenier. Trois flèches signalent trois églises, dont deux catholiques et une protestante. Vous trouvez des bureaux de poste; vous apprenez qu'il y a deux communes complétement organisées, un syndicat pour la défense du polder, un journal qui paraît une fois par semaine et qui s'occupe spécialement des intérêts de la colonie. Les récits de l'Australie sont dépassés.

« Les renseignements abondent et ils sont précis, parce que les Hollandais, gens d'affaires et de commerce, tiennent à se rendre compte. Aussi les chiffres que nous allons citer sont-ils exacts jusqu'aux unités.

« A la fin de 1859, il y avait sur l'étendue du lac 7200 habitants occupant 1660 maisons. La population avait gagné 1000 immigrants dans l'année; nous parlions tout à l'heure de trois églises; on en bâtit une quatrième, qui est protestante, et à côté de l'église sont toujours les écoles, fréquentées dès à présent par 300 enfants.

« Le lac figure une ellipse dont le petit axe a 10 kilomètres et le grand 20 kilo-

mètres, ellipse où trois des sommets sont occupés par les trois grosses machines d'épuisement; le Cruikhus, le Lynden et le Legwater. La superficie est de 18,000 hectares; 1000 hectares appartiennent aux digues, aux canaux, aux routes, aux terrains de services publics, tandis que 17,000 hectares livrés à la culture sont aussi soumis à l'impôt de défense de 20 francs par hectare.

« Leur état de mise en valeur est ainsi fixé :

	HECTARES.
Prairies de trèfle	8,100
Céréales (froment, seigle et avoine)	6,900
Racines (pommes de terre, carottes)	600
Plantes industrielles (colza, lin, garance)	1,000
Cultures diverses (pépinières, légumes)	400
Total	17,000

« On voit que les prairies balancent à peu près les cultures, grâce à la résistance des propriétaires qui imposent la prairie à leurs fermiers, très-disposés par eux-mêmes à abuser de la fertilité du sol pour faire des plantes industrielles; car le colza est presque toujours une première récolte et qui paye bien; le lin et la garance réussissent également; les céréales, d'ailleurs, tiennent une large place. On désire pourtant quelque chose de plus; ce sont des arbres, ils viennent rapidement, mais on n'en plante pas assez. On ne reconnaît la jeunesse du desséchement qu'à l'absence d'abri et d'ombrage.

« La statistique du bétail est curieuse; les exploitations qui tiennent de 50 à 150 hectares renferment :

Vaches laitières, bœufs et taureaux	3,400
Moutons et cochons	9,300
Chevaux	2,000

« Les vaches laitières, belle et puissante race, à la robe blanche et noire, passent sept mois sur la pâture, où l'on va les traire deux fois par jour pour la fabrication du beurre et du fromage. Suivant l'usage de Hollande, les moutons et les chevaux d'élève vivent sur le pré à côté des vaches.

« Voilà donc un pays neuf, qui date à peine de six ans et qui présente déjà plus d'une demi-tête de bétail par hectare. Que de départements en France voudraient être arrivés là!

« La défense du polder, confiée à un syndicat, muni d'une assez forte autorité disciplinaire, coûte de l'argent. Examinons le budget de 1860 :

RECETTES.		DÉPENSES.	
Solde créditeur de 1859	50,000 fr.	Frais d'administration	44,000 fr.
Contribut. de 17,000 hect. à 20 fr.	340,000 »	Entretien des digues	70,000 »
Location de talus	24,000 »	Frais d'épuisement et charbon	200,000 »
Emprunt et subsides	126,000 »	Travaux neufs	192,000 »
Amendes, permissions	10,000 »	Service de l'emprunt et imprévu	44,000 »
Total	550,000 fr.	Total égal	550,000 fr.

« Ainsi, le syndicat manie un budget de 550,000 francs; il travaille comme une compagnie ancienne; il a du crédit sur la place, et, au moyen des ressources supplémentaires ainsi créées, il peut améliorer; il fait doubler le nombre des

chaudières, parce que la force d'évaporation est insuffisante. Il contribue à la construction des églises et des écoles, et s'efforce surtout à développer les chemins empierrés, première condition de vie et de mouvement à la campagne. »

TRAVAUX DE FASCINAGES. — CONSTRUCTION DES DIGUES.

Il y a longtemps que les Flandres et les Pays-Bas ont commencé à construire des digues pour se défendre contre les inondations et pour mettre à l'abri des flots de la mer les terrains conquis.

Mais, à l'origine, l'industrie humaine n'était pas assez avancée; les digues les plus importantes cédèrent quelquefois, et il en résulta d'affreux désastres.

En 820, la mer rompit les digues; une inondation terrible força les habitants à gagner les hauteurs et à fuir un nouveau déluge; en 1014, beaucoup de villages furent engloutis; en 1042, beaucoup de personnes en Flandre perdirent la vie. Au commencement du douzième siècle, les Flamands durent s'expatrier; les fièvres s'étaient jointes aux inondations pour rendre le pays inhabitable.

En 1124, les premiers endiguements commencèrent par la création du polder de Lille.

Les marées du 16 février 1164 et du 1er novembre 1170 firent périr des milliers d'hommes et d'animaux, tant en Hollande qu'en Frise; de même en 1212 pour la Nord-Hollande. Mais, à partir du treizième siècle, les polders et les digues se multiplièrent; des polders, inondés plusieurs fois, furent plusieurs fois reconquis. Souvent, pendant les guerres, les digues étaient coupées pour couvrir d'eau les abords des places, et des batailles navales furent livrées à l'emplacement des polders actuels; sous le premier Empire, les abords d'Anvers et les rives de l'Escaut furent ainsi défendus contre les flottes anglaises.

A des dates plus récentes encore, on signale de graves accidents: en 1825, dans la province d'Over-Yssel, 305 habitants et 16,000 bestiaux furent noyés, 574 maisons et fermes furent emportées et 2284 endommagées.

On conçoit, d'après ces exemples, quelle importance s'attache à la construction de digues solides.

C'est avec les fascinages que l'on établit et surtout que l'on protège ces ouvrages [1].

Éléments entrant dans les fascinages. — Dans la constitution des fascinages entrent les éléments suivants (planche 7) :

1° Les piquets, de 1 à 3 mètres de longueur, dont le diamètre est $\frac{1}{25}$ de la longueur. On préfère le chêne, le saule et le noisetier. Pour les revêtements, le saule est excellent, car il reprend racine et constitue une végétation favorable à la défense. Il va sans dire que le piquet doit être droit et sans nœuds; le bout est affûté sur une longueur triple du diamètre.

2° Les fascines, formées d'une réunion de branches fines entourées par des harts.

Il y a plusieurs types de fascines. La fascine de Hollande est formée de branches de saule en pleine croissance, de 3 mètres à 3m,50 de long, réunies par

[1] Les travaux des fascinages et les endiguements des polders de l'Escaut sont décrits dans un ouvrage publié en 1850, par M. Kümmer, ingénieur des ponts et chaussées en Belgique.

deux harts, l'une à $0^m,22$ du gros bout, l'autre à $0^m,60$ plus haut; la circonférence de la première est de $0^m,50$, et celle de la seconde $0^m,40$.

La petite fascine de Brabant est formée de bois de cinq années de croissance, mélange de chêne, de bouleau, de frêne et de noisetier; on admet un quart de remplissage en saule ou aune. Il y a deux harts : la première, à $0^m,30$ du gros bout, avec une circonférence de $0^m,37$; la seconde à $0^m,50$ plus loin, avec une circonférence de $0^m,30$.

Les fascines de Hollande sont longues et flexibles; aussi conviennent-elles bien à la confection des risbermes et des ouvrages à barbes.

La fascine de Brabant convient mieux au revêtement des talus, car, avec ses branches fines et serrées, elle donne une fourrure garnie, serrée et régulière.

Pour la confection des radiers et plates-formes, que l'on immerge en les chargeant d'argile, on confectionne de fortes fascines dans lesquelles on laisse de grosses branches.

3° Les clayons, longues branches de bois flexible (chêne, charme, saule, noisetier). Les clayons, destinés à être tressés, servent à confectionner les tunages et clayonnages.

4° Le tunage, figure 4 planche VII, est formé d'une ligne de piquets enlacés de clayons tressés. Chaque tresse est formée de plusieurs brins de clayon, ordinairement quatre brins. A coups de marteau, on enfonce les tresses successives pour les rendre jointives, et lorsque le tressage est achevé, on enfonce aussi les piquets : la tête de ceux-ci, étant garnie de morceaux de souche, empêche le soulèvement des tresses. Les tunages servent à arrêter le mouvement des terres; on les place au pied des digues ou sur les talus.

5° Les saucissons, figure 2, sont de longueur variable; ce sont des cylindres formés avec des branches tirées des fascines et reliées tous les $0^m,10$ par des harts afin de maintenir le remplissage. De fortes harts supplémentaires, tordues avec un bâton, sont placées tous les $0^m,75$. Le saucisson doit être très-flexible afin de se prêter aux ondulations du terrain. On l'emploie pour constituer le grillage des plates-formes à échouer sous lest; quelquefois il remplace le tunage, lorsqu'on est pressé par le temps.

6° Les claies, dont la confection se comprend à la seule inspection de la figure 5, ont 2 mètres à $2^m,50$ de longueur; on les place sur les paillassonnages pour les protéger, et on les maintient par quatre piquets d'angle. On les utilise aussi au pied des dunes pour retenir le sable ou pour contribuer à la reformation des dunes.

7° Les roseaux s'emploient pendant l'année de leur croissance, lorsqu'ils sont sur le point de perdre les feuilles de leur sommet.

8° La paille sert à la confection des paillassonnages. On ne fait usage de la paille d'avoine qu'à défaut de paille de froment ou de seigle.

Avec ces éléments simples, on exécute d'importants ouvrages dont nous allons donner une description sommaire.

Travaux de fascinage. — 1° *Revêtements*. Les revêtements s'appliquent sur les talus des digues et les protégent contre le clapotage des vagues; ils s'étendent jusqu'à la limite des hautes mers de vive eau.

Le talus étant d'abord damé et dressé, on applique dessus un paillassonnage : le paillassonnage comprend deux couches, une de paille, l'autre de roseaux; ces deux couches sont cramponnées au talus au moyen de torsades en paille, écartées entre elles de $0^m,20$, et pénétrant en terre de $0^m,15$. L'enfoncement de

ces torsades dans la terre s'obtient au moyen d'une fourche en bois sur laquelle un ouvrier appuie de tout le poids de son corps.

Sur les digues très-inclinées ($\frac{1}{10}$), ces paillassonnages suffisent pour protéger les talus; on les remplace après les fortes marées d'équinoxe.

L'épaisseur des paillassonnages atteint $0^m,05$; ils doivent recouvrir la terre d'une manière absolue, sans qu'on puisse l'apercevoir.

Le fascinage commence par la crête du talus, au moyen de trois fascines horizontales, parallèles à cette crête; sur ces trois fascines, on en appuie d'autres, dirigées suivant les lignes de plus grande pente, le gros bout en haut; un troisième rang de fascines, placé comme le second, recouvre les deux premiers; le quatrième rang a les gros bouts tournés vers le pied de la digue et recouvre le troisième sur les deux tiers de sa longueur et la moitié de sa grosseur; les rangs successifs, en descendant vers le pied de la digue, sont disposés de même; de la sorte, on égalise la surface de revêtement qui doit avoir 12 à 15 centimètres d'épaisseur.

Le fascinage est fixé au glacis ou talus de la digue par des tunages, dirigés suivant les horizontales du talus et espacés de $0^m,20$.

Entre les tunages on place des moellons que l'on serre au moyen de coins.

2° *Radiers*. Les radiers en fascinages se placent au pied des digues qui peuvent être surmontées par les eaux, à la suite des écluses en maçonnerie, à la base d'une jetée ou d'un épi, partout en un mot où il y a à craindre des chutes d'eau et des affouillements.

Considérons le fond d'un canal à la suite d'une écluse, fond que l'on veut recouvrir d'un radier en fascinages. On commence par le dresser à marée basse, puis on pose dans le sens du courant une couche de roseaux, que l'on recouvre par une couche transversale de $0^m,96$ d'épaisseur formée avec des branches tirées des fascines.

La-dessus, on étend des fascines dans le sens du courant, fascines disposées comme nous l'avons indiqué tout à l'heure en parlant des revêtements.

Sur le tout, on place et on fixe avec des piquets un grillage en saucissons écartés entre eux de $0^m,90$ et fixés par des piquets plantés obliquement.

Comme l'ensemble pourrait être soulevé à la marée montante, on fait alterner avec les saucissons des tunages à piquets verticaux.

Les cadres des tunages sont remplis au moyen de moellons.

3° *Risbermes*. Les risbermes s'emploient pour relier aux digues ou ouvrages supérieurs des fascinages échoués à plat au niveau de la basse mer, pour former le pied des digues et garantir les terrassements contre l'action des vagues et le clapotage des eaux, pour constituer des bajoyers d'écluses, des revêtements de quai, des musoirs de jetée.

La risberme s'arrête en général au niveau des marées de vive eau.

Elle s'établit sur un fascinage échoué ou disposé sur le sol à marée basse, et se compose de couches successives de terre glaise et de fascines de hauteur égale et légèrement inclinées vers l'extérieur, comme le montre la figure 6.

Sur le premier fascinage qui touche le sol on place une couche de terre glaise destinée à remplir les vides et à faire disparaître les irrégularités de la base.

Les risbermes ont en général 3 à 4 mètres d'épaisseur. Avec une épaisseur de 3 mètres, chaque assise possède 3 rangs de fascines; les deux premiers sont le gros bout du côté de l'eau est le second est en retraite de $0^m,50$ sur le premier; le troisième rang est en sens inverse et recouvre complétement le second.

Chaque assise de fascines est fixée par des tunages, espacés de $0^m,75$; le pre-

mier est sur le talus, un peu en arrière des harts du gros bout des premières fascines.

Les intervalles entre les tunages sont remplis jusqu'à la hauteur des piquets avec de bonne terre glaise.

Chaque assise de fascine ou de terre glaise a une hauteur de $0^m,12$ à $0^m,16$.

4° *Plates-formes*. Les plates-formes à échouer sous lest sont formées de plusieurs couches de fascines comprises entre deux grillages de saucissons : leur largeur ne dépasse pas 20 mètres et leur longueur varie de 10 à 150 mètres. Elles doivent posséder une flexibilité suffisante pour épouser les ondulations du sol.

On construit la plate-forme sur une surface unie découverte à basse mer et couverte à haute mer, afin de pouvoir plus tard la conduire à l'emplacement voulu.

Ayant établi le contour de la plate-forme, on pose, dans le sens de la longueur, des saucissons espacés de $0^m,90$; ces premiers saucissons ne doivent jamais être posés dans le sens transversal parce qu'alors ils favoriseraient les infiltrations.

Sur les saucissons inférieurs on en pose d'autres en travers espacés aussi de $0^m,90$; on réunit les files longitudinales et les files transversales à leurs points de croisement par un nœud croisé de cordes dites bitord, et on plante en ces points des piquets qui ne traversent pas entièrement les saucissons inférieurs et qui n'ont pour but que de maintenir visibles les bouts de cordes ayant relié les deux files de saucissons.

Sur les saucissons inférieurs on étale transversalement une couche de roseaux et sur celle-ci on applique aussi transversalement une couche de fascines dont les gros bouts sont en saillie sur le tracé de la plate-forme ; chaque fascine recouvre la précédente sur au moins un tiers de sa longueur.

Ces deux couches affleurent le plan supérieur des saucissons transversaux : vient ensuite un second lit de fascines dirigées perpendiculairement au premier, puis un troisième lit à angle droit sur le second.

Au-dessus on place un grillage de saucissons tout semblable au premier et dont les points de croisement sont liés avec les cordes fixées aux piquets dont nous avons parlé plus haut. Les piquets sont alors enlevés et les deux grillages rendus solidaires maintiennent entre eux les roseaux et les fascines.

Les lignes de saucissons du grillage supérieur sont recouvertes de tunages. — La plate-forme étant terminée est conduite par une mer calme à son emplacement ; de chaque côté sont rangés les bateaux portant le lest, qui se compose de terre ou de pierres. — Le poids du lest doit être de 720 kilogrammes par mètre carré.

5° *Fascinages à barbes*. Ils se construisent sur place et ont pour but de fermer une digue qui n'est pas achevée ou dans laquelle une brèche s'est établie.

M. l'ingénieur en chef Defontaine en a fait grand usage sur le Rhin, à partir de 1820. Comme nous aurons lieu de décrire ces intéressants travaux lorsque nous traiterons des rivières, nous ne nous en occuperons pas ici.

Des digues. — Les digues doivent être tracées de manière à englober la plus grande surface possible sous le moindre développement.

Il faut dans le tracé éviter les angles et les remplacer par des courbes d'aussi grand rayon que possible.

Il faut étudier avec soin l'emplacement de la digue et ne pas trop l'avancer

soit en mer, soit sur les rives des fleuves, parce qu'on risque de rencontrer de mauvais terrains et de grandes difficultés d'exécution.

Souvent le sol est recouvert d'une première couche de terre ou de sable relativement résistante, tandis qu'on trouve au-dessous une vase ou une tourbe sans consistance ; il faut bien se garder alors d'entamer la couche superficielle.

La résistance des digues dépend essentiellement des matériaux qui la composent et, dans le cas qui nous occupe, de la qualité des terres dont le massif est formé et de l'adhérence qui existe entre les parties constituantes.

Il va sans dire que les calculs de stabilité ne conduisent qu'à des dimensions minima, lesquelles doivent être considérablement augmentées dans la pratique, parce qu'on ne peut faire entrer dans les formules l'action des vagues et des vents et les mille accidents de chaque jour.

Ainsi le calcul conduit à un profil en travers triangulaire, lequel évidemment ne saurait être admis.

D'un autre côté, l'inclinaison des talus dépend de la cohésion des terres ; la bonne terre franche se tient sous un talus de 45° ; la terre ordinaire prend un talus de 37°, la terre légère descend à 30° et le sable à 18°.

L'influence des vagues est variable avec l'inclinaison de talus qu'on lui présente, et sous ce rapport il y a aussi des précautions à observer.

En Hollande, les digues baignées directement par la mer et exposées à l'action des vents ont 4 mètres de largeur en crête, avec talus extérieur réglé à 10 de base pour 1 de hauteur : seulement ce talus est profilé suivant une courbe convexe de manière à augmenter l'inclinaison de la partie supérieure qui est la plus exposée et à diminuer celle de la partie inférieure, qui a moins à souffrir des vagues et qui peut du reste être protégée par des revêtements. L'inclinaison de cette partie inférieure ne doit cependant jamais s'élever au-dessus de $\frac{1}{8}$.

Pour les digues situées le long des fleuves, qui ne sont pas directement battues par la pleine mer, mais qui cependant sont exposées aux vents régnants, on adopte une largeur de 3m,50 en crête et un talus extérieur de 6 pour 1.

Lorsqu'elles ne sont pas exposées aux vents régnants, on réduit la largeur de crête à 3 mètres et le talus à 5 pour 1.

Les digues qui ne sont jamais soumises à l'action des vagues peuvent recevoir une largeur de crête de 2m à 2m,50 avec des talus à 4 ou à 3 pour 1.

Le gazon offre encore une certaine résistance sur des talus à 2 $\frac{1}{2}$ pour 1, mais c'est une limite qu'on ne saurait dépasser pour des talus mouillés ; au delà, il faut des revêtements ou des pierres.

Les revêtements en pierres sèches ont été appliqués avec succès pour les digues à la mer. Exemple : la digue d'Ostende, figure 7 planche VII. Le revêtement se compose de pierres sèches reposant sur un lit de blocailles, établi lui-même sur une couche de bonne glaise de 0m,60 d'épaisseur. L'entretien de cette digue coûte 0 fr. 05 c. par mètre carré et par an ; cet entretien consiste à regarnir les joints au moyen de coins en bois et de petites pierres.

Il va sans dire que des revêtements en pierre ne conviennent pas toujours aux terrains des Pays-Bas ; ils seraient dangereux s'il s'agissait de terrains spongieux, tourbeux et compressibles. Avec de pareils terrains, il faut autant que possible alléger les constructions et recourir à des digues en terre avec risbermes en fascinages analogues à celle du polder de Zuid-Plas précédemment décrite.

Dans le *Traité des Travaux Maritimes*, nous reviendrons du reste sur la construction des digues en maçonnerie ou en pierres sèches.

Dessèchement des moëres. — Nous n'avons guère d'exemples de polders en

France : le plus connu comprend les moëres françaises et belges situées à l'est des Watringues sur une superficie d'environ 3500 hectares. — Leur niveau moyen était à $1^{m},80$ au-dessous des plaines environnantes, de sorte qu'en été le sol restait marécageux et dégageait des miasmes pestilentiels. — Le dessèchement fut effectué en 1627 ; il comprenait l'établissement d'un canal de ceinture, la création de canaux intérieurs emmaganisant les eaux du polder et l'installation de moulins hollandais jetant au dehors les eaux surabondantes. Dix ans après, le lac était de nouveau submergé. Le dessèchement ne fut sérieusement repris et terminé qu'en 1826.

PROJET DE DESSÉCHEMENT DU LAC DE GRANDLIEU.

Le lac de Grandlieu, planche VIII, se trouve à 16 kilomètres au sud-ouest de Nantes sur la rive gauche de la Loire. Sa forme générale est celle d'un losange, dont le grand axe dirigé du nord au sud a 11 kilomètres de longueur et le petit axe 7 kilomètres. Sa superficie est de 3600 hectares.

C'est une dépression du gneiss qui reçoit les eaux torrentielles de trois rivières, la Boulogne, l'Ognon et le Tenu, et qui constitue pour ces cours d'eau un réservoir régulateur. L'écoulement dans la Loire maritime se fait par un seul émissaire, le canal de l'Acheneau, ouvert à travers une plaine submergée en hiver.

Il y a longtemps que l'idée du dessèchement de ce lac a été mise en avant. « Dès 1400, dit M. Mille, on proposait des projets aux ducs de Bretagne ; à la veille de la Révolution, l'intendant de la province avait autorisé l'opération, qui d'ailleurs était préparée par une autre. Les bénédictins de Buzay avaient eu, en 1711, le mérite d'assainir la vallée de l'Acheneau : voyant l'ancien débouché de Vue se perdre au milieu des atterrissements, ils avaient ouvert à travers les alluvions anciennes le canal de Buzay, complété plus tard par des écluses à l'entrée en Loire. L'effet ne s'était pas fait longtemps attendre, et 3000 hectares de prairies fauchables avaient émergé au-dessus du marais. Signalons encore un projet présenté à l'Empereur en 1806, lorsqu'il visita la Bretagne, projet qu'on écarta parce qu'il prenait comme émissaire, non plus l'Acheneau, route naturelle des crues, mais le canal de Haute-Perche, où un parcours de 25 kilomètres était remplacé par un autre de 50 kilomètres. »

Depuis le commencement du siècle, deux projets ont été présentés, l'un par M. Vallès en 1840, l'autre par M. Mille en 1859. Ce projet a soulevé d'énergiques oppositions et a été combattu par M. l'ingénieur en chef Éon-Duval.

Nous examinerons successivement les deux projets et le mémoire de M. Éon-Duval.

Projet de M. Vallès. — L'étude de M. Vallès est insérée aux *Annales des ponts et chaussées* de 1848 : elle est inspirée par le beau travail de de Prony sur les marais pontins.

Comme l'auteur le fait remarquer tout d'abord, les principales données d'un projet de dessèchement, celles qui doivent lui servir de base, sont :

1° La hauteur annuelle de pluie qui tombe sur le bassin considéré ;

2° La hauteur maxima et moyenne de pluie fournie par les orages ;

3° Le coefficient d'absorption des terres, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de pluie absorbée par le sol et la quantité de pluie totale ; du coeffi-

cient d'absorption on déduit le coefficient d'écoulement, c'est-à-dire le rapport des eaux superficielles à la pluie totale; le coefficient d'écoulement est en relation directe avec les crues des cours d'eau, puisque les crues violentes sont alimentées uniquement par les eaux superficielles;

4° L'évaporation annuelle.

Mais ces données ne peuvent s'obtenir d'une manière exacte que par une longue série d'expériences.

Cette longue série a manqué à M. Vallès; c'est pourquoi son projet pèche par la base. Il a pris comme point de départ des chiffres reconnus depuis complétement faux.

Ainsi, il admet comme hauteur de pluie annuelle à Nantes 1m,22; il trouve que l'intensité des orages varie d'une hauteur de 0m,065 à 0m,014, et il adopte comme intensité moyenne 0m,040; dans ce cas de l'intensité moyenne, la tranche d'eau superficielle, c'est-à-dire celle qui se rendrait directement aux rivières, serait de 0m,017.

Ces chiffres sont en opposition formelle avec ceux qu'a bien voulu nous communiquer M. Éon-Duval :

« Il résulte de 29 années d'expériences consécutives que la hauteur d'eau tombée varie réellement de 0m,40 à 0m,90 dans la Loire-Inférieure et qu'elle est en moyenne de 0m,624. »

Il résulte des observations faites aux grands réservoirs alimentaires du canal de Nantes à Brest, que le rapport m de la quantité d'eau arrivée aux réservoirs au cube d'eau tombé sur le bassin alimentaire varie de 0,08 à 0,40 et est en moyenne de 0,23; que ce rapport augmente généralement avec la hauteur d'eau tombée, mais qu'il est singulièrement influencé par la répartition de la pluie pendant l'année. Les eaux superficielles sont d'autant plus abondantes qu'il tombe plus de pluie en hiver et moins en été; ainsi que nous avons eu l'occasion de le dire plusieurs fois, les pluies d'été ne profitent guère aux cours d'eau, à moins qu'il ne s'agisse de versants imperméables et rapides.

Le rapport m, entre la hauteur des eaux superficielles et la hauteur totale de pluie, peut s'exprimer dans la Loire-Inférieure par la formule suivante :

$$m = 0^m,50 - \frac{1}{6H},$$

formule dans laquelle H représente la hauteur totale de pluie.

Le rapport m s'annulerait donc pour $H = 0^m,33$; bien qu'il ne faille jamais appliquer les formules empiriques aux situations extrêmes, cette particularité ne doit pas être éloignée de la vérité, puisque la seule année où la hauteur de pluie est descendue à 0m,40, le rapport m n'a été que de 0,08.

Des explications précédentes il résulte que les nombres du projet de M. Vallès sont nécessairement inexacts, ce qui, du reste, n'enlève pas à son travail sa valeur théorique.

Il est donc inutile d'en examiner les détails d'exécution, et nous nous bornerons à dire qu'il entourait le lac d'une digue de ceinture, flanquée d'un canal de navigation, lequel recevait les eaux extérieures au lac et les conduisait à Buzay par l'émissaire de l'Acheneau; qu'il enlevait les eaux intérieures au moyen de deux machines à vapeur ayant chacune une puissance de 20 chevaux; qu'enfin il ménageait dans la digue d'enceinte des déversoirs et des vannages destinés à laisser pénétrer les eaux dans le polder en cas d'orages exceptionnels, et à permettre l'irrigation du polder pendant les sécheresses.

Projet de M. Mille. — Le plan général, figure 1, planche VIII, s'applique au projet de M. Mille.

La grande levée orientale commence au sud, près de Saint-Philbert, dans le coteau des Jamonnières, où elle s'enracine et se poursuit jusqu'à la butte voisine de Saint-Mars-de-Coutais. Elle porte presque partout en dehors de l'eau sur un fond relativement solide : les traversées de la Boulogne, de l'Ognon et de l'Acheneau, sont seules vaseuses et n'offrent pas de difficultés plus sérieuses que celles qu'on rencontre dans l'exécution des digues hollandaises.

Le profil en travers de cette grande levée est donné par la figure 3, planche VIII. Elle entoure 3760 hectares, dont 600 seulement de terres sablonneuses, formant la grève de Passay; le reste est composé d'une terre noire et vaseuse, renfermant 0,75 d'azote pour 100, c'est-à-dire le tiers de l'azote existant dans le fumier normal.

La cuvette du lac a la forme d'une coupe évasée, comme le montre la figure 2 ; si l'on adopte comme point de comparaison le zéro de l'échelle de Buzay, et que l'on mette en regard les surfaces couvertes par les eaux et les hauteurs correspondantes de la retenue, on trouve que pour les niveaux $1^{m},70$, $1^{m},00$, $0^{m},75$, $0^{m},50$ et $0^{m},00$, la superficie mouillée du lac est de 3400, 1400, 720 et 16 hectares.

Le niveau de l'eau dans le polder doit être maintenu au zéro de l'écluse de Buzay, et il en est de même du plafond du canal de navigation juxtaposé à la digue.

Pour faciliter l'écoulement, il faut évidemment curer l'Acheneau à vif pour en abaisser partout le fond au niveau du zéro de Buzay.

Ce travail effectué, l'écoulement sera possible, car en temps ordinaire la ligne des basses mers est voisine du zéro de l'écluse de Buzay ; il y a donc dénivellation entre le canal émissaire et la Loire maritime, et par suite l'écoulement se produit; à la mer montante, les portes de l'écluse de Buzay se ferment pour se rouvrir à la basse mer suivante, et laisser échapper une nouvelle quantité d'eau.

Malheureusement, les portes de Buzay cessent de s'ouvrir utilement lorsqu'elles sont chargées de plus d'un mètre d'eau à basse mer, et, dans ce cas, quelle que soit la largeur donnée à l'écluse, il n'y a plus écoulement de l'Acheneau à la Loire maritime.

Or, ce phénomène se produit dès que la Loire est en crue, c'est-à-dire pendant la saison humide, et précisément à l'époque où il faudrait donner issue aux eaux surabondantes du lac et de l'Acheneau.

Pendant l'hiver 1852-1853, les portes de Buzay furent trois mois inutiles ; les eaux s'accumulèrent dans le lac et dans la vallée, et cet état de choses ne prit fin qu'à la baisse de la Loire.

Un débouché toujours libre serait donc, dit M. Mille, un grand bienfait ; il deviendrait la sauvegarde du pays, parce que, l'écoulement s'opérant avec rapidité, on n'aurait jamais à redouter la coïncidence fatale des crues.

Ce débouché toujours libre, M. Mille le trouve à 8 kilomètres en aval de Buzay, au Migron, et il prolonge l'Acheneau par le canal du Migron, qui a une longueur de 10 kilomètres et une largeur de 10 mètres au plafond, avec talus inclinés à $\frac{3}{2}$. Au Migron, la basse mer est inférieure de $0^{m},50$ à la basse mer de Buzay ; c'est donc une chute de $0^{m},50$ en descendant ainsi vers l'aval l'embouchure de l'émissaire, et cet avantage est acheté par un allongement de parcours de 5 kilomètres. Lors des crues du fleuve, la courbe de raccordement des eaux

fluviales avec la basse mer se prolonge au delà de Buzay et du Migron, mais elle a une certaine pente entre ces deux points, et lorsque l'écluse de Buzay ne fonctionne plus, le Migron travaille encore, même aux jours de crue exceptionnelle.

L'ouverture du nouveau débouché est donc le seul moyen de donner sécurité complète à la vallée.

Grâce à lui, le polder sera pour toujours asséché, on ne sera plus exposé à le submerger de nouveau pour sauver la vallée de l'Acheneau des inondations.

Sur la rive occidentale du lac, un simple fossé de délimitation suffirait; mais il vaut mieux le remplacer par un petit canal de $5^m,00$ d'ouverture, propre à la navigation.

On profite de la chute de $0^m,50$ au Migron pour donner au canal de ce nom une pente de $0^m,05$ par kilomètres, et à son embouchure en Loire, on établit une écluse à sas de 10 mètres de large, garnie d'une double paire de portes et capable d'arrêter le fleuve en crue ou de maintenir les eaux à un niveau convenable dans la vallée.

Les débouchés du Migron et de Buzay suffiront à abaisser le niveau du lac de $1^m,70$ à $0^m,50$, et l'épuisement sera achevé par une machine à vapeur de 40 chevaux.

La dépense s'élèvera à 3 millions et demi.

La seule crainte à concevoir est relative à l'écoulement des crues produites par les pluies continues de la saison humide. La présence du lac n'a pas empêché l'inondation de 1853 : lorsque ce réservoir régulateur sera supprimé, n'y a-t-il pas lieu de craindre des inondations plus redoutables encore? Non, répond M. Mille, car le canal du Migron, avec une hauteur d'eau de $2^m,50$, une largeur de $34^m,20$ et une pente de $0^m,05$, peut débiter 16 mètres cubes à la seconde; si de son côté le débouché de Buzay travaille aussi, l'Acheneau, vidé par ces deux orifices, sera bientôt débarrassé.

En ce qui touche la vidange du lac, il contient entre la cote 1,70 et la cote 1 mètre 19 millions de mètres cubes d'eau, entre 1^m et $0^m,50$ 3 millions et demi de mètres cubes; reste au-dessous un étang de 300 hectares avec 1 500 000 mètres cubes que la machine à vapeur sera chargée d'enlever avant qu'elle ne serve à l'entretien du polder.

Les deux premières tranches s'en iront par le canal du Migron, grâce au jeu des marées : au Migron, les marées ont déjà leur allure régulière, le flot et le jusant règnent chacun pendant six heures environ; pendant le flot, les portes seront fermées; pendant le jusant, elles seront ouvertes et fonctionneront comme si le niveau de la mer restait à la cote constante de $0^m,42$; considérons le lac à la cote moyenne de $1^m,55$; il y aura par le canal un débit de 57 mètres cubes. Cela fait 246 000 mètres cubes par jour, et en 77 jours les 19 millions seront épuisés, sans tenir compte du débouché de Buzay réservé pour secours.

En répétant les calculs pour la déuxième tranche, on verra que le débit est réduit à $2^m,15$. — Cela fait 100 000 mètres cubes par jour, et la deuxième tranche sera épuisée en 55 jours.

Les vitesses moyennes ont été calculées par la formule des ingénieurs italiens :

$$u = 50\sqrt{r.i}.$$

Le travail achevé, le lac sera remplacé par un domaine de 3000 hectares, où

chaque hectare représentera au moins 4500 fr. et où la valeur foncière s'élèvera en total à 14 millions de francs.

Objections et contre-projet de M. Éon-Duval. — M. l'ingénieur en chef Éon-Duval, chargé de défendre les intérêts des propriétaires de la vallée de l'Acheneau, commence par contester l'utilité publique du dessèchement du lac de l'Acheneau.

« Il n'y a pas d'utilité publique, dit-il, à supprimer le modérateur naturel d'une vallée de 1250 kilomètres carrés.

En effet, la vallée de l'Acheneau est située à plus de 1 mètre en contre-bas des hautes mers de vive eau en Loire et n'a pas de pente longitudinale. Souvent, l'écoulement de ses eaux ne peut se faire que par intermittence; et, par suite, il est indispensable pour cette vallée d'avoir un puissant réservoir qui permette de ne les envoyer que peu à peu et en quantités telles qu'il n'en arrive pas trop à la fois vers son débouché. On cherche à établir d'immenses réservoirs sur nos principaux fleuves pour en atténuer les crues. On ne peut donc rationnellement songer à supprimer le lac de Grandlieu; on devrait peut-être le créer, s'il n'existait pas naturellement.

Quoique nous ne soyons pas compétent en matière de salubrité, nous n'avons pu nous dispenser d'être frappé de ce que l'assèchement du lac mettrait à découvert 3000 hectares aussi chargés d'azote que s'ils contenaient un tiers de fumier. Cette situation doit inspirer les plus graves inquiétudes sous le rapport sanitaire; les statistiques médicales, d'accord avec la notoriété, indiquent le voisinage du lac comme suffisamment sain. Que deviendra ce pays, au moins pendant plusieurs années?

Un lac n'est pas un marais. Autant un marais est insalubre, autant un lac peut être favorable à la santé.

Depuis un siècle, bien des projets de dessèchement du lac ont été présentés; jamais une voix ne s'est élevée en leur faveur dans le pays; tous, sans distinction de classe ou d'opinion, ont toujours été unanimes pour en proposer le rejet. On sentait parfaitement que le lac ne se remplacerait pas et que la nécessité de déversoirs et de vannes de décharge suffisait pour prouver que les projets étaient inadmissibles. »

Dans le cas où, malgré les observations précédentes, l'utilité publique du dessèchement serait reconnue, il y aurait lieu de faire subir au projet les modifications suivantes (les cotes étant toujours prises par rapport au zéro de l'écluse de Buzay) :

1° Le dessécheur ne pourrait être autorisé à faire varier le plan d'eau du canal de Buzay de la cote $1^m,50$ à la cote $2^m,00$, à introduire l'eau de mer pour maintenir le niveau entre les limites susdites, et à faire en tout temps des prises d'eau dans le canal de ceinture pour l'irrigation de son polder.

En effet, à la cote de 2 mètres, 900 hectares de prairies de la vallée de l'Acheneau sont submergés, et ce serait un désastre à l'époque des récoltes si on permettait au dessécheur d'établir cette cote lorsqu'il le désirerait; et il serait porté à le faire pendant l'été afin de maintenir dans le canal de ceinture assez d'eau pour obtenir un bon arrosage de son polder.

La situation de la vallée serait donc beaucoup moins bonne qu'actuellement, puisque le syndicat de Buzay a le droit d'abaisser la cote à $1^m,75$. D'un autre côté, les eaux de mer sont très-vaseuses; on serait forcé d'en introduire en été de grandes quantités; de là des dépôts considérables et des envasements dont le draguage serait coûteux.

Il y a donc lieu de fixer la cote d'étiage de l'émissaire à $1^m,60$, attendu que les plus bas marais sont à la cote $1^m,70$, et de permettre l'irrigation du polder tant que les eaux dans le canal de ceinture ne seront pas descendues au-dessous de $1^m,40$.

Comme le plafond des canaux et rivières doit être porté à $0^m,20$ au-dessous du zéro de Buzay, on aura toujours pour la navigation un tirant d'eau de $1^m,60$.

2° L'Acheneau et le canal de Buzay seraient approfondis à la cote $0^m,20$ au-dessous du zéro, on leur donnerait une largeur minima de 15 mètres, le busc de l'écluse de Buzay serait descendu de 1 mètre et sa largeur serait portée à 15 mètres, ce qui permettrait de créer sur l'Acheneau et le canal une pente de fond de $0^m,03$ par kilomètre.

Par ces moyens, on créerait un débouché bien supérieur à celui du Migron et du canal actuel réunis et on économiserait plusieurs centaines de mille francs. Si les deux débouchés étaient créés, l'un des deux s'envaserait nécessairement ainsi que cela est arrivé pour l'ancien canal de Vue.

D'après M. Mille, pendant l'hiver de 1852-1853, les portes de Buzay n'étaient d'aucun service, alors qu'elles supportaient au moins 2 mètres au plus faible de la marée.

C'est une erreur, dit M. Éon-Duval, car l'eau était en amont de Messan, à 4 kilomètres de la Loire, à la cote de $3^m,50$ au moins, ce qui à mer basse constituait sur la longueur susdite une pente de $1^m,50$ capable de donner un débit énorme.

Ainsi, les crues de la Loire en hiver ne gêneraient pas sérieusement l'écoulement des eaux de l'Acheneau.

Les crues d'été sont plus à craindre. M. Éon-Duval examine les crues de mai et juin 1856, il dresse un tableau indiquant pour chaque jour la hauteur de la Loire à Nantes, l'apport de la vallée de l'Acheneau et le débit par Buzay; il en déduit la cote intérieure des eaux, l'apport n'étant pas assez considérable pour établir des pentes appréciables.

Dès que la cote $1^m,70$ est dépassée, de vastes plaines submersibles commencent à être envahies par les eaux, et pour connaître la cote finale, il faut employer la méthode des cubatures ainsi que M. Éon-Duval a eu soin de le faire. Il trouve ainsi que pendant les crues de mai et juin 1856 le niveau intérieur n'aurait pas dépassé $1^m,86$, en supposant effectués les travaux d'approfondissement et d'élargissement ci-dessus signalés, et en supposant, en outre, que la digue de ceinture a été reculée dans le lac de manière à ménager entre la Boulogne et l'Ognon un réservoir modérateur de 800 hectares de superficie. C'est à la puissance de ce modérateur que serait dû presque uniquement le bon résultat qu'on obtiendrait, et sans lui il serait impossible, lors des crues d'été, de maintenir au-dessus de l'eau une grande partie de la vallée qui se trouve actuellement hors de l'atteinte des inondations d'été.

En ce qui touche les crues d'hiver, M. Éon-Duval reprend les calculs de débit présentés par M. Mille; suivant lui, dans les apports d'eau considérables, la pente des eaux entre l'embouchure de la Boulogne et le bas de la vallée sera plus grande que ne le suppose le projet; il y aura donc surélévation à l'amont et abaissement à l'aval, de sorte que le débit en Loire tombera au-dessous des prévisions et que des inondations se produiront dans les parties supérieures de la vallée.

Avec les modifications du projet réclamées par M. Éon-Duval, le mal serait

de beaucoup atténué, et dans les crues les plus intenses, la cote de l'eau à l'embouchure de la Boulogne ne dépasserait pas 3m,50.

Mais il vaut mieux, conclut M. Éon-Duval, abandonner le projet de dessèchement; car l'avantage de livrer à l'agriculture 3600 hectares de terrain ne semble pas suffisant pour compenser les inconvénients du projet sous les rapports hydraulique, sanitaire et politique. — Avec une dépense inférieure à 1 million, on peut construire une écluse à Buzay, approfondir et élargir au besoin le canal de Buzay et l'Acheneau, et faire dans le lac un chenal de navigation, de manière à permettre l'abaissement permanent de l'étiage à la cote de 1m,60. Tous les intérêts engagés seraient satisfaits dans une juste mesure, même ceux du propriétaire du lac qui pourrait mettre en valeur plusieurs centaines d'hectares de terrain.

Conclusion. — Le projet de dessèchement du lac de Granlieu n'a pas été suivi d'exécution, et, si nous avons parlé de ce projet, c'était pour mettre en relief les difficultés techniques et pratiques que soulèvent les grandes entreprises de ce genre.

Ainsi que nous le verrons encore en traitant des canaux d'irrigation, ces entreprises présentent souvent de graves mécomptes, et c'est avec la plus grande prudence qu'il faut les aborder en ayant soin de réserver à l'imprévu une très-large part.

INFLUENCE DES MARAIS SUR LA SANTÉ PUBLIQUE.

Les lacs et les étangs, dont l'eau se renouvelle sans cesse ou dont les abaissements de niveau n'entraînent pas l'émersion de grandes surfaces de terre, ne sont pas dangereux pour la santé publique, ils lui sont plutôt salutaires. Mais les marais, alternativement submergés et mis au jour, sont le siége d'une fermentation putride que la chaleur active; les miasmes et les ferments se répandent dans l'air et engendrent des fièvres, souvent terribles; quelquefois, ces ferments sont transportés par les vents à de grandes distances. Ce qui caractérise les marais, ce sont les alternatives fréquentes de vie et de mort aussi bien pour les animaux que pour les végétaux. Les terrains imperméables qui retiennent les eaux sont éminemment favorables au développement des marais; les plateaux perméables au contraire sont très-sains et ne conservent pas d'eau superficielle. Dans les vallées perméables, le défaut de pente et de débouché des cours d'eau peut déterminer la production de marécages; mais, lorsque ceux-ci sont asséchés, les miasmes disparaissent bien vite et n'ont plus tendance à reparaître.

Le dessèchement des marais imperméables est plus longtemps à faire sentir ses effets bienfaisants, mais ils n'en sont pas moins réels, ainsi que le prouvent de nombreux exemples.

A 12 kilomètres au sud-ouest de Rochefort se trouvait le marais de Brouage, sur lequel les rapports officiels de 1819 donnent les détails suivants :

« 6000 hectares environ sont couverts d'eaux marécageuses où s'amoncellent avec une égale rapidité la vase, les roseaux et les poissons. Échauffés par les ardeurs de l'été, ces divers objets, et surtout les anguilles entassées en véritables bancs, fermentent, se corrompent et exhalent au loin tous les miasmes de la plus horrible putréfaction. Des nuées de moustiques et d'insectes remplissent

cet air méphytique et l'arment encore d'un nouveau fléau; d'innombrables reptiles sillonnent le sol de toutes parts; point d'arbres pour purifier tant de gaz délétères et servir d'abri contre un soleil brûlant; point de routes certaines pour sortir de cet inextricable labyrinthe; à peine quelques cabanes éparses, quelques pâtres dont les traits livides révèlent l'inévitable consomption.

« Plus ou moins communs aux abords des marais, les mêmes symptômes attestent encore au delà la même influence. Chaque année les fièvres lentes et endémiques que développe cette influence minent et déciment à plusieurs lieues de distance la population des communes environnantes, dont la mortalité dépasse le treizième de la population. Chaque année les troupeaux mêmes sont ravagés par les plus terribles épizooties. »

La situation, que le rapporteur officiel de 1819 signalait dans un style trop imagé peut-être, s'est bien améliorée depuis : le dessèchement a été commencé en 1824; les terrains ont augmenté de valeur, et les diverses causes d'insalubrité se sont amoindries. Elles n'ont pas encore complétement disparu, et cela tient à la nature imperméable du sol qui rend très-difficile un dessèchement complet.

Les plantations sont, comme nous l'avons vu en parlant de la plaine de l'Habra, un puissant auxiliaire des travaux de dessèchement.

Régime des ouvriers employés aux dessèchements. — Dans les climats tempérés et dans les climats chauds, la période d'exécution des travaux de dessèchement est des plus dangereuses, puisqu'elle possède, outre les miasmes du marais, ceux qu'engendrent toujours les grands mouvements de terre.

Aussi, les travaux de ce genre ne doivent-ils, autant que possible, être exécutés que pendant la saison froide, et il faut imposer aux ouvriers qu'on y emploie un régime spécial.

M. Carvallo, ingénieur des ponts et chaussées, chargé de la canalisation de l'Èbre, a nettement indiqué, dans les *Nouvelles Annales de la Construction*, mai 1867, les précautions à prendre : nous les reproduirons d'après lui :

« Deux défauts, dit-il, caractérisent les terres basses : elles sont trop compactes comme tous les dépôts très-ténus; elles sont extrêmement dures et sèches dans la chaleur, réduites à l'état de boues visqueuses par les temps de grande pluie.

« L'agriculture raisonnée et intelligente fournit des moyens sûrs de combattre ces deux difficultés : le travail *mécanique*, les *engrais verts à longue paille* et des *fossés à ciel ouvert*, assez profonds et en nombre suffisant, transforment en peu de temps le sol cultivé.

« Mais il est une difficulté plus grande qui a pendant des siècles arrêté la mise en culture suivie, rationnelle et largement productive de ces plaines fécondes; c'est la question de l'hygiène, c'est *la fièvre* en un mot, qui emporte et décime les ouvriers, et qui jette le découragement dans les entreprises les plus énergiquement organisées.

« Quand on parcourt ces vastes territoires, on est frappé du petit nombre de fermes isolées qui se rencontrent dans la campagne.

« Les villages sont groupés sur de petites collines, les laboureurs font des lieues entières pour se rendre aux champs ou pour en revenir.

« Ils ne partent qu'après le lever du soleil, ils hâtent leur rentrée avant le coucher. Leur teint hâve et jaunâtre, les femmes amaigries et dépourvues de tous les charmes qui sont l'apanage de la jeunesse et de la santé, des enfants au teint verdâtre, au ventre ballonné, vous disent bien vite que vous entrez dans le domaine des fièvres paludéennes.

« La fièvre, voilà l'ennemi.

« Si l'on peut parvenir à le combattre et à le vaincre, le succès est assuré. Aussi croyons-nous que l'étude des moyens appropriés à ce but est le point de départ de toutes les exploitations agricoles du genre de celles dont il s'agit, et nous croyons rendre service à nos lecteurs en leur faisant part des résultats de notre expérience.

« On nous pardonnera le peu d'importance apparente des détails qui vont suivre : dans une semblable question, tout est dans ces détails.

« *Régime normal.* — Voilà le régime que nous avons appliqué, soit dans les *grands travaux de terrassements* en Italie, en France, en Espagne, soit dans les *rizières* que nous avons créées dans les *prados* ou *llanos* du delta de l'Èbre.

« Nos travailleurs ne sortent qu'après le lever du soleil. On leur donne d'abord, à jeun, un petit verre d'eau-de-vie ou une tasse de café.

« À neuf heures, ils prennent un premier repas et font un déjeuner léger en fumant une cigarette.

« A midi le déjeuner tonique, avec soupe et portion de viande.

« A quatre heures, repos et goûter. Pendant toute la journée, il leur est sévèrement interdit de boire de l'eau.

« On leur distribuait, au début, chaque jour un litre de vin par homme et du café; aujourd'hui les ouvriers apportent leur vin, dont ils doivent faire l'usage le plus strictement modéré.

« Malgré ces précautions, les hommes qui s'exposent à dormir, dans le jour, sur la terre nue, ou qui sont surpris, ayant chaud, par une pluie abondante ou par un orage, étaient fréquemment atteints de la fièvre marétique.

« Le sulfate de quinine à haute dose, légèrement aiguisé d'acide sulfurique, triomphait de ces accès assez facilement.

« Notre expérience prolongée nous permet d'affirmer qu'aucune des personnes qui se sont le plus exposées, même de nuit après le coucher du soleil, même le matin avant son lever, aux émanations des marais, et cela, dans les périodes les plus dangereuses d'août, septembre et octobre, n'a été atteinte en observant le régime suivant :

« *Régime médical.* — Prendre un peu de café au quinquina le matin à jeun, avant de traverser les marais;

« Nourriture tonique, boisson d'eau mélangée de café, non sucré;

« Usage extrêmement modéré de vin pur;

« Emploi de la glace pour rafraîchir les boissons et détruire les principes de fermentation que peuvent contenir les eaux exposées au soleil et renfermant des détritus organiques plus ou moins abondants, comme celles des canaux d'irrigation.

« Toutefois, les appareils *Carré*, que l'on peut employer à cet effet, ont pour inconvénient que les sels employés se décomposent à la chaleur; et si l'on ne peut pas se procurer de glace naturelle, il est plus simple et plus sûr de conserver les eaux servant à la boisson dans de grands réservoirs intérieurs abrités de la chaleur, et sur des filtres de charbon et de galets maritimes.

« Des exemples nombreux et répétés permettent d'assurer qu'avec ce régime régulièrement suivi on peut préserver la santé de tous les travailleurs. »

LÉGISLATION DES DESSÉCHEMENTS.

Législation ancienne. — Henri IV avait concédé au Hollandais Bradley le droit de dessécher tous les marais du royaume, moyennant la possession de la moitié des surfaces desséchées.

En 1764 parut un édit qui exemptait les dessécheurs de marais de tout impôt pendant 20 ans.

Plusieurs desséchements furent opérés sous ce régime ; mais la plupart suscitèrent des procès et des difficultés sans nombre peu faites pour encourager les entrepreneurs de travaux de ce genre.

En 1790, une loi de desséchement fut préparée, mais resta lettre morte.

Loi de 1807. — La loi de 1807 fut considérée comme un grand progrès; néanmoins on l'a vivement attaquée, tantôt parce qu'elle ne protégeait pas assez la propriété privée, tantôt parce qu'elle ne donnait pas aux concessionnaires des bénéfices suffisants. La vérité est qu'il semble impossible, en ces matières, de ne pas froisser quelque intérêt, et qu'il est très-difficile de concilier l'intérêt général avec les intérêts particuliers.

Voici les deux premiers articles de la loi du 16 septembre 1807 :

Art. 1er. — La propriété des marais est soumise à des règles particulières.

Le gouvernement ordonnera les desséchements qu'il jugera utiles ou nécessaires.

Art. 2. — Les desséchements seront exécutés par l'État ou par des concessionnaires.

Dans notre opinion, des opérations de ce genre devraient toujours être effectuées par l'État; en pratique, on a presque toujours eu recours à des concessionnaires.

Dans ce cas, la concession est accordée à celui qui réclame la plus faible indemnité de plus-value. A égalité, on préfère à un étranger un groupe de propriétaires intéressés.

Les concessions sont faites par décrets rendus en conseil d'État, sur des plans dressés ou contrôlés par des ingénieurs des ponts et chaussées, après enquête.

Le titre II est relatif à la fixation de l'étendue, de l'espèce et de la valeur estimative des marais avant le desséchement. Un syndicat des propriétaires intéressés nomme un expert chargé de l'évaluation des terrains, le concessionnaire en nomme un autre, et le préfet un troisième. Les ingénieurs sont adjoints aux experts pour lever les plans et tracer les périmètres des diverses classes de terrains. Le plan et le classement des terrains sont approuvés par le préfet, et soumis pendant un mois aux observations du public; le préfet peut ordonner un supplément d'information. Après la répartition des terrains en classes, les experts fixent le prix afférent à l'unité de chaque classe; leur procès-verbal est soumis à une enquête d'un mois : les réclamations sont jugées par le conseil de préfecture. L'estimation doit être homologuée par la commission spéciale dont il sera parlé ci-après, et cette commission spéciale n'est pas forcée de suivre l'avis des experts.

D'après le titre III, lorsque le desséchement ne peut être opéré en 3 ans, l'acte de concession pourra accorder aux concessionnaires une portion en deniers du produit des fonds qui ont les premiers profité des travaux.

Le titre IV considère les marais après le desséchement. Quand les travaux sont reçus, les experts font une nouvelle classification des fonds desséchés, et cette classification est suivie d'une estimation dans la même forme que tout à l'heure.

D'après le titre V, des rôles sont alors établis, portant pour chaque propriété la plus-value et la proportion qui en revient au concessionnaire; les propriétaires peuvent se libérer en délaissant une partie du fonds. Le rôle des plus-values est arrêté par la commission spéciale et rendu exécutoire par le préfet.

Lorsqu'un desséchement est fait par l'État, sa portion dans la plus-value sera fixée de manière à le rembourser de toutes ses dépenses.

Pendant la durée des travaux, c'est le concessionnaire qui est chargé de l'entretien de tous les ouvrages. Après la réception des travaux, l'entretien et la garde sont à la charge des propriétaires (titre VI). Une commission syndicale est établie à cet effet.

Le titre X règle l'organisation et les attributions des commissions spéciales, formées de sept membres nommés par le chef de l'État et pris parmi les personnes connaissant le mieux les localités et les matières sur lesquelles elles auront à se prononcer. Ces commissions ont les pouvoirs énumérés aux paragraphes précédents.

La loi de 1807 sur les desséchements est complétée, surtout après l'exécution des travaux, par la loi du 14 floréal an XI relative aux travaux de curage et d'endiguement.

Loi du 21 juin 1865. — Nous avons donné les principaux articles de la loi du 21 juin 1865 en traitant de la législation des curages.

Pour les travaux de desséchement comme pour les autres travaux énumérés à l'article 1er, l'unanimité des intéressés peut se réunir en association libre. Mais, en outre, conformément à l'article 8, les propriétaires intéressés à l'exécution des travaux de desséchement peuvent être réunis, par arrêté préfectoral, en association syndicale autorisée, soit sur la demande d'un ou de plusieurs d'entre eux, soit sur l'initiative du préfet.

La majorité des intéressés, établie comme nous l'avons dit pour les travaux de curage, peut donc forcer la minorité à exécuter les travaux. Le législateur n'a pas voulu que, dans une matière si grave, le mauvais vouloir de quelques-uns pût arrêter une opération profitable non-seulement à des intérêts particuliers, mais à la salubrité publique.

Les règles à suivre pour l'application de la loi de 1865 aux travaux de desséchement sont les mêmes que pour les travaux de curage.

Nous n'insistons pas sur ces questions, que nous reprendrons en détail dans la section relative au droit administratif.

CHAPITRE II

DRAINAGE

DÉFINITION DU DRAINAGE.

Le drainage, de l'anglais *drain* (égout), est une opération qui consiste à assécher le sol par voie souterraine. L'expulsion des eaux en excès se fait non pas par des rigoles et fossés à ciel ouvert, mais par des cavités intérieures.

Autrefois, on creusait dans le sol à assainir des tranchées, au fond desquelles on plaçait des fascines ou des pierrailles, que l'on recouvrait de gazons ou de bonne terre franche bien pressée, et on achevait de remplir la fouille avec les produits du déblai.

C'est en Angleterre et en Écosse, pays de terres fortes, que le drainage a commencé à se développer sérieusement au commencement de ce siècle. On remplaça sur certains points les pierrées par des aqueducs à section triangulaire ou rectangulaire, formés de trois ou de quatre pierres plates, figure 1, planche X, arc-boutées les unes contre les autres, surmontées de pierrailles et d'un remblai en terre.

Vers 1830, on vit apparaître le drainage en poterie : le premier système se composait d'une tuile creuse, posée sur une tuile plate, figure 2; ce n'est guère qu'en 1840 qu'on eut recours au système simple des tuyaux en terre cuite, placés bout à bout.

Tel est aujourd'hui le seul système usuel : les files de tuyaux sont espacées de 8 à 20 mètres, suivant les terrains, leur profondeur est de 1 mètre à $1^{m},80$; les nombreux joints des tuyaux dont une file est composée reçoivent l'eau des nappes souterraines, qui tombe naturellement par l'effet de la pesanteur : ces suintements multipliés se réunissent dans les tuyaux et y forment un courant. Les courants élémentaires se rendent dans des tuyaux de plus grand diamètre qu'on appelle les collecteurs, et ceux-ci aboutissent aux fossés, aux cours d'eau ou aux puisards chargés d'absorber le produit du drainage.

Cette description sommaire nous suffira pour comprendre les effets que le drainage exerce sur les qualités physiques et chimiques des terres et sur la végétation.

EFFETS DU DRAINAGE.

Le drainage produit quatre genres d'effets différents : 1° des effets physiques; 2° des effets chimiques; 3° des effets météorologiques et hygiéniques; 4° des effets agricoles.

Au point de vue physique, il enlève les eaux stagnantes et abaisse les nappes d'eau souterraines; il diminue l'évaporation et aménage les eaux pluviales; il donne de la porosité aux terres les plus compactes, et en rend la culture incomparablement plus facile; il enlève aux terres leur froideur, c'est-à-dire que la chaleur qu'elles reçoivent en été n'est plus absorbée par l'évaporation de l'eau surabondante; elle produit un autre travail plus utile, celui de la végétation.

Au point de vue chimique, le drainage permet à l'air et aux gaz qui le composent de circuler dans le sol et d'y produire les réactions nécessaires à la germination, à l'assimilation des engrais et des amendements.

Au point de vue météorologique, le drainage diminue les brouillards; ceux-ci se manifestent, en effet, surtout sur les terrains marécageux, où la nappe d'eau est à fleur de sol; il met l'atmosphère en contact avec une surface saine et vivante, qui ne lui abandonne pas de décompositions putrides, et c'est ainsi qu'il agit au point de vue hygiénique en améliorant le climat et en éloignant de la surface du sol une humidité constante.

Les effets agricoles sont des plus importants : le drainage permet les labours profonds en toute saison, il ameublit la terre, la rend plus douce à travailler et lui enlève son excès de compacité et d'adhérence. Il rend possibles les cultures fourragères, à racines pivotantes, là où les eaux surabondantes du sol les rendaient impossibles. La culture perfectionnée avec ses assolements peut alors s'établir avec succès et profit. Les conséquences agronomiques et financières du drainage, dit M. de Villeneuve, sont donc enfermées, non point dans la quantité de gerbes de plus que rend un terrain drainé, soumis à une mauvaise rotation de céréales, sans culture fourragère intercalée, mais dans ce fait agronomique bien autrement fécond : le drainage rend possibles les lucratives rotations agricoles fondées sur l'alternance des meilleures cultures fourragères. C'est là une amélioration qui, en France, vaut moyennement 40 francs de revenu par hectare.

A tous ces avantages s'en ajoutent d'autres, que M. de Villeneuve résume ainsi :

L'amélioration du cours des eaux, la multiplication des sources artificielles remplaçant les barrages, les mares et les étangs artificiels; les irrigations devenant ainsi plus faciles, les inondations moins désastreuses, la navigation plus régulière, les dérivations moins chères, et le débit des canaux plus régulier. Voilà les conséquences heureuses d'un drainage largement exécuté.

Les irrigations elles-mêmes peuvent devenir plus faciles, si l'on introduit de l'eau dans les drains qui propageront l'humidité dans le sol, sans accroître la compacité de la superficie, et qui permettront l'introduction et l'émission successives de l'air atmosphérique dans le sol. L'irrigation par le drainage permettrait ainsi de réaliser, le mieux possible, les effets de cette circulation de l'air dans la terre si bien indiqués dans l'excellent traité de M. Barral.

Tels sont, exposés en quelques lignes, les avantages du drainage, que reconnaissent aujourd'hui les agriculteurs les plus incrédules. Pour ne laisser aucun point obscur, nous allons étudier avec détails les principaux effets que nous venons de signaler.

Le drainage empêche l'excès d'humidité. — La terre végétale se compose d'une infinité de petits corps poreux, séparés les uns des autres par des vides ou canaux. Si on l'amplifie et qu'on la regarde au microscope, elle ressemble à un tas de pierres qui laissent entre elles de nombreux vides. Seulement, dans la terre végétale, chaque pierre ou plutôt chaque molécule isolée est poreuse, et susceptible d'absorber de l'eau comme le ferait une éponge. Cette propriété hydroscopique est variable, suivant la nature des terres, ainsi que nous l'avons vu en hydrologie.

Lorsque les molécules terreuses sont chargées d'humidité, sans que l'eau remplisse les canaux qui les séparent, l'air et la chaleur circulent librement dans ces canaux, et c'est un état favorable à la végétation.

Si les molécules viennent à s'assécher complétement, la végétation s'arrête, car l'eau est indispensable pour ses réactions.

Mais si les canaux viennent à s'emplir d'eau complétement, les molécules étant elles-mêmes saturées, la végétation s'arrête encore. Les gaz utiles à la transformation des éléments nutritifs n'arrivant plus, les matières fertilisantes ne peuvent être assimilées par les racines; et il se développe surtout des plantes paludéennes sans valeur.

Le drainage a pour but de maintenir le sol dans cet état intermédiaire entre l'extrême sécheresse et l'extrême humidité. L'eau nécessaire à la végétation est énergiquement maintenue par la capillarité; quant à celle qui remplit les canaux où l'eau doit circuler, elle descend par le fait de la pesanteur et pénètre par les joints dans l'intérieur des tuyaux d'où elle s'écoule à l'extérieur.

Par le drainage, les eaux des nappes inférieures et celles des sources ne peuvent remonter à la surface; les eaux des pluies ne ravinent plus la surface, mais au contraire pénètrent dans le sol ameubli qu'elles enrichissent avec les substances minérales qu'elles contiennent; l'infiltration de la pluie et l'écoulement des tuyaux détermine à travers le sol un appel incessant d'air atmosphérique, et cet air est précieux pour le développement des racines et des plantes.

Le sol, délivré de l'excès d'humidité qui le rendait compacte, devient graduellement doux et friable. On n'y voit plus de ces mottes énormes qu'on a peine à écraser. La culture devient plus facile et exige beaucoup moins d'efforts.

Le drainage équivaut à un approfondissement du sol. — Le drainage permet donc à travail égal d'attaquer le sol plus profondément avec la charrue. Mais, outre cet avantage, il a celui d'augmenter la profondeur du sol utile à la végétation.

Dans les terres humides non drainées, la nappe d'eau reste toujours à une faible distance au-dessous de la surface, et les racines ne peuvent descendre bien loin, car elles ne trouvent pas à s'alimenter dans la nappe d'eau continue. L'abaissement de cette nappe permet aux racines de descendre aussi profondément qu'elles le veulent, et d'aller puiser dans les couches inférieures les éléments nutritifs qu'elles renferment et qui souvent y dormaient inutiles depuis des siècles. Les racines n'ont même pas d'effort à faire pour vaincre la compacité des couches subjacentes, parce que ces couches sont ameublies par la circulation de l'air et fendillées par l'effet du dessèchement.

Il en résulte un accroissement considérable dans la production et une meilleure utilisation des réserves du sol, si bien que la plus-value des récoltes couvre et au delà les dépenses faites.

Dans les terres de bonne qualité qui sont humides, on ne peut cultiver les plantes fourragères à racines pivotantes, la luzerne par exemple; l'excès de l'eau s'oppose à la pénétration des racines. Cet inconvénient disparaît avec le drainage, et les prairies artificielles prospèrent dans des sols précédemment rebelles à ce genre de culture.

Le drainage réchauffe le sol. — La chaleur absorbée par les terres humides sert tout entière à l'évaporation de l'eau; le sol reste froid et la végétation souffreteuse.

Avec le drainage, la nappe d'eau s'éloigne, la chaleur pénètre profondément dans le sol poreux, et l'air lui sert de véhicule.

Les réactions se font mieux dans un milieu plus chaud, et la végétation devient plus active. Elle commence plus tôt, et cela avance l'époque de la moisson. La maturation se fait mieux : c'est une opération qui demande de la chaleur.

Le drainage équivaut donc à un changement de climat, à un réchauffement du sol.

Le drainage diminue les effets des sécheresses. — Sur ce point, l'*Instruction sur les Drainages dans le Loiret* s'exprime ainsi :

« Il est reconnu que l'évaporation de l'eau contenue dans le sol décroît rapiment, lorsque la distance du liquide à la surface du champ augmente. Conséquemment, si l'on suppose le terrain formé de couches minces placées les unes sur les autres, et que la sécheresse ait été assez grande pour achever d'enlever à la première couche, non-seulement l'eau des vides, mais encore celle que renferment les molécules spongieuses, on peut admettre que toutes les parties de la seconde couche ne seront pas desséchées. La troisième conservera plus d'eau que la seconde, la quatrième davantage encore, si bien qu'à une certaine profondeur il restera toute l'eau nécessaire pour une bonne végétation. Il est donc évident que, plus les racines pénètreront profondément, moins les sécheresses seront à craindre. Et comme l'effet du drainage est de faire descendre les racines dans le sol, on a le droit de dire que cette opération est aussi bonne pour prévenir les inconvénients de la sécheresse que pour faire disparaître ceux d'une trop grande humidité. »

Doit-on craindre que les drains, en soutirant l'eau du sous-sol, puissent produire en-dessous ce que les sécheresses font à la surface? Évidemment non. L'action de l'air dans les tuyaux ne peut être comparée à celle que les vents et le soleil produisent sur les champs. La capillarité suffit pour contre-balancer et même surmonter la pesanteur et l'effet de l'air dans les drains; il ne passera par ceux-ci que l'eau placée dans les vides du terrain, en dehors des limites des forces capillaires, et le sol conservera les liquides dont il a besoin, ceux contenus dans les molécules spongieuses, qui seuls, pour ainsi dire, facilitent la décomposition des sucs et leur assimilation par les végétaux.

Le drainage ne laisse pas perdre les engrais. — Ici, se présente une objection qu'on s'est faite dès l'abord : le drainage ne permet-il pas aux eaux, qui s'infiltrent dans le sol, de le lessiver et de lui enlever les principes solubles qui sont sa principale richesse au point de vue agricole?

Pour combattre l'objection, on pourrait, dit M. Maitrot de Varennes, s'en tenir à l'observation des terres naturellement perméables : si, effectivement, les eaux qui filtrent dans ces terres amoindrissaient notablement la fécondité, il s'en-

suivrait forcément que les bassins perméables seraient très-inférieurs, comme fertilité, aux bassins imperméables, ce qui n'a pas lieu, toutes choses égales d'ailleurs.

La plaine de la Beauce est une des plus fertiles de France; c'est un plateau éminemment perméable, un véritable crible, et cependant sa fertilité est toujours la même.

Dans les terres froides non drainées, les eaux pluviales engendrent des courants superficiels qui entraînent l'humus, ainsi qu'une grande proportion des éléments solubles des engrais. — Tout cela est perdu pour la végétation. — Supposez que ces courants pénètrent dans le sol : leur voyage entre la surface et le drain se fait avec une grande lenteur, les molécules terreuses s'imprègnent et retiennent une partie des matières minérales dissoutes, ainsi que font tous les corps poreux ; les racines des plantes, dont les suçoirs sont en contact de toutes parts avec le liquide chargé de sels et de gaz dissous, absorbent ces éléments qui profitent à la plante.

Le drainage diminue donc plutôt qu'il n'augmente les pertes d'engrais causées par les pluies et a l'avantage d'utiliser une partie des sels que les eaux superficielles auraient entraînés.

Les analyses de M. Boussingault ont montré qu'il existait dans les eaux de drainage une proportion d'ammoniaque beaucoup moindre que celle qu'on rencontre dans les eaux de pluie. Mais, en revanche, les analyses de M. Barral ont fait découvrir dans les eaux de drainage 12 fois plus d'acide azotique qu'il n'en existe dans les pluies d'orage : cela prouve que l'ammoniaque et les matières azotées du sol s'oxydent sous l'influence de l'air, de l'humidité, de la chaleur, et grâce à la présence de corps poreux, il se forme de l'acide azotique qui peut être entraîné jusqu'aux drains lorsque surviennent des pluies prolongées. En donnant à la terre un fumier dans un état de décomposition peu avancée, on amoindrirait, suivant M. Boussingault, l'inconvénient des pluies prolongées.

Le drainage causât-il un réel appauvrissement du sol, ce qui n'est pas démontré, car les expériences chimiques sont trop peu nombreuses et les expériences pratiques ne conduisent pas à cette conclusion, faudrait-il pour cela renoncer à une opération qui a produit des effets si salutaires ?

« Evidemment non, sur tous les terrains humides et de faible rapport. Cette ammoniaque, cet acide azotique que vous regrettez, vous en devez la formation au drainage lui-même, qui permet la circulation de l'air dans le terrain et qui en élève la température. Le terrain, aux dépens duquel il se forme, était pour vous une matière morte ; si une partie s'en écoule sans profit, le résultat de vos récoltes vous prouve que les plantes en utilisent une autre partie. »

Le drainage améliore les terrains les plus argileux. — Bien des propriétaires et cultivateurs, ne saisissant pas nettement le fonctionnement du drainage, se demandent comment cette opération peut assainir les argiles compactes qui semblent absolument réfractaires au passage de l'eau. M. Olivier, dans ses *Instructions élémentaires pour le drainage dans le Loiret*, l'explique facilement :

Un propriétaire, dont nous visitions les terres, nous montrait une mare pleine d'eau depuis longtemps, bien qu'elle fût située à 3 mètres environ d'un chemin creux dont la chaussée se trouvait à plus de 2 mètres en contre-bas du fond de cette mare.

Il lui semblait impossible que les tuyaux de drainage eussent plus d'action que le chemin, et il regardait l'opération comme devant causer une dépense sans aucun résultat.

L'objection était sérieuse et nous avons cherché à la combattre par les observations suivantes.

Disons d'abord comment les drains agissent dans l'argile. — Lorsque les pluies arrivent après une grande sécheresse, elles trouvent le sol coupé de crevasses plus ou moins profondes, mais sans issues, et ne tardent pas à couvrir le sol. L'argile se mouille, se détrempe, et forme une pâte compacte tout à fait imperméable, l'eau ne peut plus s'en aller qu'en coulant à la surface et par l'évaporation.

Tant que les terres sont mouillées, il est impossible d'y entrer pour les cultiver, et les racines sont privées de l'air dont elles ont besoin. Lorsque les argiles viennent à sécher, elles se serrent sur elles-mêmes, se fendillent et se divisent par petites masses tellement dures qu'il est bien difficile de les travailler, les racines des plantes manquent d'air dans les masses trop compactes et d'eau dans les crevasses.

Il résulte de cet état de choses que les opérations de la culture ne peuvent pas se faire en temps utile, et que les récoltes laissent toujours à désirer.

Lorsque de tels terrains sont drainés, l'air des tuyaux dessèche les couches en contact avec eux ; celles-ci prennent du retrait, se fendillent, et permettent à la dessiccation de se propager peu à peu. Pour produire cet effet, l'air doit encore agir d'une autre manière.

Plus léger que l'eau, il tend à la remplacer dans les terres, et facilite sa chute dans les drains. Après un temps plus ou moins long, les crevasses déterminées par les drains rejoignent celles de la surface du sol, et les eaux peuvent s'écouler assez vite pour éviter que les argiles se mettent en pâte. Alors le terrain plus sec permet aux racines de pénétrer profondément et aux vers de s'y loger. Celles-ci et ceux-là tracent dans le sol de petits conduits, déposent des détritus, facilitent l'écoulement des eaux, et modifient la nature du sol au point de le rendre perméable et de permettre la culture des terres en tout temps. A cet avantage viennent se joindre tous ceux indiqués ci-dessus en parlant du drainage dans les terrains froids et humides.

Les effets du drainage dans les terres argileuses sont longtemps à se produire. Il faut souvent dix-huit mois, deux ans pour qu'ils arrivent à la surface, mais enfin on obtient les résultats qu'on s'était promis : l'expérience le prouve et se charge de répondre à toutes les objections faites contre le drainage des terres argileuses.

Ce que nous venons de dire explique pourquoi la mare dont il est question plus haut n'est pas desséchée par le chemin creux situé à 3 mètres d'elle.

S'il faut dix-huit mois aux tuyaux pour fendiller le sol sur $1^{m},20$ de hauteur, les sécheresses, même les plus grandes, ne peuvent pas couper le massif séparant le chemin et la mare avant que les pluies viennent détruire les crevasses en train de se former. D'un autre côté, la végétation, l'action des animaux et des phénomènes atmosphériques sur le talus du chemin s'opposent à ce qu'il puisse, dans l'argile, drainer autour de lui.

Le fait signalé n'est donc pas une objection contre le drainage des argiles, puisque le chemin n'agit nullement comme des tuyaux placés dans le sol. Ceux-ci, tant qu'ils restent vides, dessèchent les couches dont ils sont entourés d'une manière continue et sans que rien puisse venir contrarier leur action ou détruire ce qu'ils ont déjà produit; leur effet est certain, il suffit de savoir l'attendre.

DES TERRAINS SUSCEPTIBLES D'ÊTRE DRAINÉS.

Les terrains susceptibles d'être drainés sont les terres froides ou fortes, les sols argileux, en un mot les terrains imperméables.

Les terrains perméables sont presque toujours drainés naturellement ; néanmoins, il peut arriver que la nappe d'eau souterraine y soit très-voisine de la surface, qui devient alors molle et marécageuse. Dans ce cas, le drainage peut-être utile même dans des masses perméables, dans des terrains tourbeux, par exemple ; mais il doit être pratiqué avec discernement et il ne faut pas dépasser le but en asséchant le sol outre mesure, en multipliant les émissaires plus qu'il n'est nécessaire.

La règle générale est donc que le drainage s'applique aux sols imperméables, et c'est ce que M. Belgrand a fait ressortir dans son ouvrage intitulé : *La Seine, études hydrologiques et agricoles*.

« *A priori*, dit-il, on peut affirmer que la plus grande étendue des terrains perméables peut se passer de drainage, puisque les eaux pluviales disparaissent dans le sol au point même où elles tombent. Il n'y a d'exception qu'au fond des vallées les plus profondes, où coulent de rares cours d'eau habituellement bordés de marais tourbeux ou de prairies humides, et cette exception est peu importante dans le bassin de la Seine, puisque les marais et les prairies n'y occupent pas la centième partie de la surface des terrains perméables.

« Les terres labourables des calcaires oolithiques de la Basse-Bourgogne, de la craie blanche de la Champagne, de la Normandie et des autres plateaux qu'elle draine naturellement, des terrains éocènes de l'Ile-de-France, du Valois, du Soissonnais, du Vexin, aussi bien que des sables de Fontainebleau et du calcaire de Beauce, n'exigent donc jamais de drainage.

« Les véritables terrains à drainer sont les terrains imperméables, c'est-à-dire, le granite du Morvan, le lias de l'Auxois, du bassin de Corbigny, de la banlieue de Langres, les sables impurs et les argiles du terrain crétacé inférieur qui couvrent les plaines ondulées de la Champagne humide, de la Puisaye et du pays de Bray, l'argile plastique, les plateaux argileux tertiaires du Gâtinais, de la Brie, de Satory et des sources de l'Eure et de la Rille. Le drainage de ces terrains produit toujours un effet utile, excepté lorsqu'ils sont cultivés en prairies, car alors le drainage les rend perméables et ils deviennent impropres à ce genre de culture ; cependant, les prairies du granite peuvent être drainées dans certains cas.

« D'après cela, le drainage n'est jamais utile dans les terrains perméables quand ils sont cultivés en prairies; il est toujours utile dans les terrains imperméables, excepté quand ils sont cultivés en prairies. »

Il existe dans le bassin de la Seine 19440 kilomètres carrés susceptibles d'être drainés; le drainage est inutile sur les 59 210 kilomètres carrés qui complètent la superficie totale.

D'après les calculs faits sur la carte géologique de France, l'étendue du sol imperméable de notre pays est de 21 millions d'hectares. Les deux tiers de la surface sont en culture; c'est donc 14 millions d'hectares qui sont susceptibles d'être drainés dans une mesure plus ou moins grande.

En général, on reconnaît facilement qu'un terrain a besoin d'être drainé : la

couleur du sol, la nature et l'aspect des plantes qui le recouvrent, la qualité de l'herbe, sont autant d'indices.—Au mois de mars, lorsque les vents dessèchent le sol, on reconnaît immédiatement les places restées trop humides. — Lorsque la terre est grasse, qu'elle s'attache aux pieds des hommes et des chevaux, lorsque les eaux de pluie séjournent longtemps dans les cavités et les sillons de la surface, lorque les bestiaux enfoncent dans le sol, lorsque pendant la sécheresse la terre se durcit et se fendille, on peut dire qu'elle a besoin d'être drainée.

Les plantes qu'on rencontre sur les terrains humides et marécageux, et dont la présence indique la nécessité du drainage, sont les suivantes :

Jonc commun.	Bugle.	Trèfle ordinaire, blanc.
Plantain lancéolé.	Chardon des marais.	Orchis à larges feuilles.
Colchique d'automne.	Cresson fleuri.	Flouve odorante.
Prêle, queue de cheval.	Aigremoine.	Poa aquatique.
Renoncule.	Valériane dioïque.	Jonc congloméré, de crapaud.
Laiche ou carex.	Populage des marais.	Menthe aquatique.
Millepertuis des marais.	Oseille ordinaire, oseille crépue.	Bruyère grisâtre.

Suivant M. Boitel, il n'y a dans toutes ces plantes que la flouve odorante et le trèfle que les animaux mangent avec plaisir. Les autres sont mauvaises. « Le colchique d'automne est connu de tout le monde ; de loin, ses feuilles ressemblent à celles d'un gros poireau ; ses fleurs, d'un lilas tendre, longues d'environ un décimètre, apparaissent en automne après la destruction des feuilles ; son fruit passe l'hiver en terre ; au printemps, le support du fruit s'allonge et sort de terre entouré de feuilles larges et pressées. Le colchique est une plante très-vénéneuse que les animaux se gardent bien de manger. » Elle est commune dans les prairies humides ; on la fait disparaître en extrayant les bulbes, qui se trouvent à 25 centimètres de profondeur.

Pour éclaircir encore cette question de la détermination des terrains qui ont besoin d'être drainés, nous reproduirons quelques passages des *Instructions sur le drainage*, rédigées par M. l'ingénieur en chef de Hennezel pour le département de la Sarthe :

« Les terrains auxquels le drainage est appliqué avec l'utilité la plus évidente, dit cette brochure, sont les *terres froides* et les *terres fortes*. Dans l'usage ordinaire, ces deux dénominations sont fréquemment employées l'une pour l'autre ; mais nous désignons ici exclusivement sous le nom de *terres froides* celles qui, sans être imperméables par elles-mêmes, reposent sur un sous-sol imperméable, et sous le nom de *terres fortes* celles où l'élément argileux domine.

« Les premières sont précisément dans le cas d'un pot de fleurs dont le fond ne serait pas percé. Les eaux qui y arrivent de la surface, et celles qui sourdent très-fréquemment dans cette sorte de terrains, les maintiennent dans un état constant d'humidité très-défavorable à la végétation.

« Des engrais même abondants ne peuvent leur donner qu'une médiocre fertilité. Il faut, en effet, pour que les engrais agissent utilement, qu'il subissent dans le sol une fermentation telle que les racines y trouvent toutes les substances nécessaires à leur développement ; et cette fermentation ne peut se produire que sous l'influence de l'humidité, de la chaleur, et surtout de l'air.

« Une eau stagnante dans le sol donne lieu à un genre de décomposition qui y fait naître, soit des solutions trop concentrées de matières organiques, soit des principes acides et ferrugineux. Ces éléments ne conviennent qu'à la nutrition de certaines plantes de tissus lâches et spongieux. Si le terrain est en

prairies, les joncs, les roseaux, les prêles, les mousses, plusieurs espèces de carex, etc., viennent remplacer peu à peu les espèces utiles, et l'on n'obtient plus qu'un mauvais fourrage, souvent très-nuisible aux bestiaux. Dans les terrains cultivés, les plantes souffrent de cette humidité constante qui en pourrit les racines. La plus légère gelée forme d'ailleurs sur les billons une croûte de glace qui s'attache autour des jeunes plantes, les endommage et les déracine.

« L'eau qui imbibe le terrain, n'ayant pas d'issue inférieure, ne peut se dégager qu'à la surface, par l'effet de l'évaporation; mais l'eau absorbe, pour passer à l'état de vapeur, une quantité considérable de calorique qu'elle rend latent, et toute la chaleur que l'évaporation enlève ainsi est perdue pour la végétation. Les vents du printemps tendent bien à dessécher la couche superficielle; mais si le terrain est *sourceux*, ce qui a presque toujours lieu avec un sous-sol imperméable, l'eau souterraine remplace au fur et à mesure celle qui s'évapore; l'évaporation et la perte de calorique continuent donc, en même temps que l'air et la chaleur solaire ne peuvent pas pénétrer dans le sol. Cette double cause de refroidissement affaiblit les plantes, retarde leur croissance et leur maturité, lorsqu'elles n'ont pas été détruites par les gelées et les dégels successifs du printemps, et elle compromet entièrement les récoltes dans les années pluvieuses.

« Quant aux terres *fortes* ou *argileuses*, elles ont à la fois la propriété nuisible de ne pas laisser assez facilement pénétrer l'eau de la surface, et de la retenir trop facilement lorsqu'elles en sont imprégnées. Il résulte de là que, suivant la saison, elles pèchent alternativement par un excès de sécheresse et par un excès d'humidité.

« La dureté qu'elles acquièrent sous l'action prolongée des vents et du soleil arrête tout à fait la végétation, car la grande cohésion du sol, outre qu'elle est un obstacle physique à ce que les racines s'y étendent, intercepte l'accès de l'air et de l'eau qui sont nécessaires pour qu'elles puissent se nourrir. S'il survient une pluie, elle a promptement saturé la croûte extérieure; et l'eau ne pouvant plus s'infiltrer, la plus grande partie coule à la surface qu'elle ravine lorsque la pente est prononcée, et dont elle entraîne les engrais et les particules les plus utiles à la vie végétale. Cet effet d'appauvrissement du sol se produit de même lorsque les pluies continues de l'automne ont profondément humecté la terre; de plus, l'eau absorbée étant très-fortement retenue, l'humidité permanente fait alors éprouver aux plantes l'action si dommageable des gelées et de l'évaporation dont nous avons parlé plus haut.

« Mais le plus grand inconvénient qui résulte pour l'agriculture de la nature des terres argileuses, surtout lorsqu'on ne peut en modifier la consistance et les propriétés par l'emploi des amendements calcaires, c'est la grande difficulté qu'on éprouve à les cultiver. Si l'on s'y prend trop tôt, la terre est tellement dure qu'on y perd son temps, ses instruments et ses forces; si l'on attend trop tard, le sol est détrempé et pâteux, les attelages s'y enfoncent et éprouvent également une très-grande résistance. Dans les deux cas on ne fait qu'un mauvais travail; la terre reste en mottes qu'on a beaucoup de peine à briser, et il est très-rare que les semailles faites dans ces conditions puissent réussir. La culture de ces terres exige donc bien plus de peine, de temps, et par conséquent d'argent que celle des terres plus légères; le succès reste d'ailleurs en grande partie subordonné à la possibilité qu'a trouvée le cultivateur de les travailler dans un moment opportun, qu'il ne dépend pas toujours de lui de saisir, surtout dans une exploitation de quelque importance.

« Les observations qui précèdent ne concernent d'une manière absolue que les deux types généraux de terrains que nous avons définis; mais on comprend que si, comme l'expérience le prouve, le drainage est éminemment utile pour ces deux classes, il peut encore convenir, dans une certaine mesure, pour une série de terrains intermédiaires entre elles, et cela d'autant plus que ces terrains participent davantage de la nature de l'une ou de l'autre, ou de toutes deux à la fois. »

DE L'UTILITÉ DU DRAINAGE SUIVANT LE CLIMAT.

Pour se rendre un compte exact de l'effet du drainage, il faut connaître à chaque époque de l'année le débit des drains correspondant à une surface donnée et à une nature de terrain déterminée. Des expériences spéciales ont été entreprises à cet effet; nous ne les rapporterons pas ici.

Le débit d'un drain est facile à mesurer à chaque instant, si ce drain débouche dans une auge en bois, munie d'un déversoir ou d'orifices en mince paroi dont on peut ouvrir un nombre variable. C'est ce dernier procédé qu'employait M. Hervé-Mangon. Il se servait d'une caisse dont la paroi antérieure était percée de trous circulaires de diamètre connu; en ouvrant un nombre de trous plus ou moins considérable, on arrivait à maintenir dans l'auge un niveau constant, c'est-à-dire que l'apport du drain était débité par l'ensemble des orifices ouverts. Or le débit de ces orifices est facile à calculer par les formules usuelles; on en déduit donc le débit du drain à la seconde.

Pour des drains à faible débit on imaginera sans peine d'autres procédés plus simples d'évaluation.

Mais il est, suivant M. de Villeneuve, une méthode plus générale pour se rendre compte des effets du drainage, et pour déterminer quelle est la portion de pluie absorbée par la terre et quelle est celle qui s'évapore. Il suffit de faire porter ses expériences sur des terrains naturellement perméables; car les terrains imperméables, lorsqu'ils sont drainés depuis quelque temps, se transforment en terrains perméables; à moins que leur pente ne soit considérable, ils ne retiennent plus d'eau superficielle et de la pluie qu'ils reçoivent font deux parts : une qui pénètre dans le sol, l'autre qui retourne dans l'atmosphère par l'évaporation.

Dans quelle proportion se fait le partage? c'est ce qu'il s'agit de déterminer.

La question a été étudiée en Angleterre par Dalton, Dickenson et Charnock, qui ont donné les nombres suivants :

	QUANTITÉ DE PLUIE.	ÉVAPORATION DE LA TERRE.	FILTRATION ABSOLUE.	FILTRATION P. 100 DE PLUIE.
Charnock.	629	503	126	20
Dalton.	852	638	214	25
Dickenson.	665	381	284	41

Il y a donc de grandes différences entre les trois observateurs, différences qui tiennent sans doute, non pas à des erreurs, mais à la variété des circonstances expérimentales.

Une expérience faite pendant l'année 1851, en France, dans le département de Seine-et-Marne, a donné les résultats suivants :

Quantité de pluie, 518 millimètres ; évaporation de la terre, 455 millimètres.

Ici, la filtration pour 100 de pluie n'est plus que de 12 ½.

Si l'on construit pour chaque année la courbe des pluies, en prenant les mois pour abcisses, et si l'on construit aussi la courbe de l'eau mensuelle évaporée, celle-ci est inférieure à la première, et les portions d'ordonnée comprises entre les deux courbes mesurent les quantités d'eau qui ont pénétré par filtration dans le sol et ne sont pas retournées dans l'atmosphère.

L'étude de ces courbes révèle une loi générale que M. Belgrand a mise en lumière dans ces dernières années.

La filtration est abondante pendant les mois pluvieux et très-faible pendant les mois chauds ; inversement, l'évaporation, peu active pendant les mois humides, dévore la pluie pendant les mois chauds, et ne la laisse pas descendre dans le sol. Les pluies d'hiver seules profitent aux nappes d'eau souterraines ; les pluies d'été retournent rapidement dans l'atmosphère à l'état de vapeur.

C'est ce qui résulte des expériences suivantes de Dickenson et de Dalton.

MOIS.	NOMS DES OBSERVATEURS.	QUANTITÉ DE PLUIE.	EAU ÉVAPORÉE.	EAU QUI S'EST INFILTRÉE DANS LE SOL.
Janvier.	Dickenson.	47 mill.	14	33
	Dalton.	62 »	23	27
Juillet.	Dickenson.	58 »	57	1
	Dalton.	105.5	104	1.5

L'évaporation sera donc d'autant plus considérable dans un pays, que les pluies estivales seront elles-mêmes plus abondantes, puisqu'elles s'évaporent presque en entier.

Inversement, le complément de l'évaporation, la filtration qui alimente les nappes d'eau souterraines sera d'autant plus grande que les pluies d'hiver auront été plus abondantes, ce sont les seules qui profitent aux cours d'eau.

Charnock, dont nous citions tout à l'heure les expériences, opérait sur une terre continuellement saturée d'eau ; il a reconnu que l'évaporation de cette terre était inférieure à celle d'une surface égale de liquide, et cela se conçoit sans peine, si l'on réfléchit que la vapeur d'eau s'échappe plus facilement lorsqu'elle n'est pas retenue par une affinité pareille à celle qu'exerce la terre sur l'eau, affinité qui va jusqu'à faire condenser une partie notable de la vapeur d'eau atmosphérique.

Cependant, pour que la proportion précédente soit vraie, il faut admettre que masse liquide est exactement à la même température que la terre saturée. Souvent dans les mois chauds, après des chaleurs prolongées, la terre, qui possède pour l'absorption des rayons solaires une puissance supérieure à celle de l'eau, la terre a emmagasiné des quantités de chaleur considérables : vienne une pluie, cette chaleur emmagasinée se vaporise rapidement, si bien que certaines pluies d'orage sont, pour ainsi dire, rendues à l'atmosphère aussitôt que reçues, et peuvent tomber plusieurs fois de suite au même lieu sans pour cela laisser trace d'humidité à l'intérieur du sol. L'eau pure est restée en retard re-

lativement à l'échauffement de la terre et sa surface rend alors à l'atmosphère moins de vapeur que n'en rend la surface du sol.

L'infériorité de l'évaporation du sol par rapport à celle des surfaces liquides est donc vraie, surtout dans les premiers mois de l'année ; à la suite des mois chauds, il peut se faire que l'évaporation de la terre atteigne et dépasse par moments celle de la surface des eaux.

L'influence des radiations solaires emmagasinées par la terre est encore mise en évidence par ce fait que la courbe d'évaporation de l'eau pure à l'ombre est toujours inférieure à la courbe d'évaporation de la terre saturée exposée au soleil.

Dans des expériences faites à Genève, une terre drainée a donné, pendant les mois de décembre, janvier et février, une vaporisation supérieure à celle de l'eau pure.

Pendant l'hiver, lorsque les gelées blanches sont fréquentes et que la terre, rayonnant sa chaleur vers les espaces célestes, se refroidit plus que l'air en contact avec elle, l'évaporation diminue et finit par s'annuler.

Suivant M. de Villeneuve, la diminution de l'évaporation de la terre peut aller jusqu'au point où l'évaporation devient négative, c'est-à-dire que la terre refroidie peut condenser la vapeur d'eau de l'atmosphère. La filtration peut alors produire plus d'eau que la pluie n'en a livré. Ce cas s'est présenté dans les observations d'un sol drainé faites par Dickenson, et on en a constaté aussi plusieurs exemples en France.

Le résumé des expériences connues, faites en Angleterre sur les terrains drainés, conduit aux nombres suivants :

La hauteur de pluie annuelle étant de.	715	millimètres.
La quantité d'eau que conserve la terre est de.	210	—
Et la quantité d'eau évaporée qui retourne à l'atmosphère est de.	505	—

Suivant la répartition des pluies dans le cours d'une année, les oscillations, de part et d'autre de la moyenne, se règleront d'après les circonstances énumérées plus haut.

Dans le bassin de la Seine, d'après M. Dausse, le débit général annuel de la Seine correspond à une couche de 120 millimètres d'eau répandue sur tout le bassin ; la hauteur moyenne de pluie étant de 600 millimètres, la part de l'évaporation atteindrait 480 millimètres. Ce nombre s'applique à la généralité des terrains ; mais sur les terrains perméables, l'évaporation est beaucoup plus considérable ; elle est moindre, au contraire, sur les terrains imperméables.

Si du climat séquanien, où les pluies d'été l'emportent sur les pluies d'hiver, nous passons au climat méditerranéen, qui présente les caractères inverses, pluies d'été inférieures aux pluies d'hiver, nous devons trouver une filtration relativement plus abondante. Dans la filtration se trouve comprise l'eau superficielle, dont la quantité est considérable sous le climat méditerranéen, à cause de la forte inclinaison des versants et du grand nombre des cours d'eau torrentiels.

La filtration dans le bassin méditerranéen est 2,5 fois plus forte que dans le bassin séquanien ; dans le plateau du Ventoux, qui alimente la source de Vaucluse, la filtration annuelle atteint 427 millimètres.

Si l'on admet qu'il tombe dans le bassin méditerranéen 600 millimètres d'eau de pluie par an, l'évaporation de la terre en consomme 276 millimètres, et l'alimentation des cours d'eau prend le reste, soit 324 millimètres.

Il en résulte cette conclusion étrange au premier abord : c'est que les terres du climat méditerranéen sont plus sujettes que celles du nord de la France à être envahies pendant l'hiver par un excès d'humidité, et que l'opportunité du drainage s'y fait plus vivement sentir en beaucoup de points.

EXEMPLES D'ANCIENS DRAINAGES, PIERRÉES.

L'assèchement des terres par fossés surperficiels paraît avoir été pratiqué dès la plus haute antiquité. Dans les écrits que nous ont laissés les Romains sur l'agriculture, on trouve la description de quelques drainages par pierrées, c'est-à-dire qu'au fond des fossés d'assainissement on jetait des pierres dont on recouvrait le massif avec des gazons et des terres.

Nous avons dit que jusqu'au dix-huitième siècle les pierrées et les fascinages furent seuls en usage et reçurent dans certains pays un grand développement. Vers 1830 prit naissance le drainage en poterie, qui se composa d'abord d'une tuile creuse posée sur une tuile plate, et qui devint ensuite le système simple des tuyaux cylindriques placés bout à bout.

Cependant ce système des tuyaux a été employé au moyen âge, et on en a retrouvé des vestiges près de Maubeuge. Le travail, qui avait produit d'excellents résultats, remontait à 1620 et semblait l'œuvre des moines oratoriens de ladite ville.

Mais c'est là une exception, et avant 1830 le type du drainage est la pierrée, qui est encore susceptible d'être employée en bien des pays, et dont nous allons dire quelques mots.

Drainage des Prés-Saint-Gervais. — On trouve à Paris même un exemple curieux de drainage par empierrement.

C'est un réseau qui s'étend sous le sol des Prés-Saint-Gervais, de Romainville et de Ménilmontant. Ce réseau absorbe les eaux d'un bassin sans écoulement superficiel, occupé par les marnes de la formation gypseuse parisienne, bassin qui se développe sur un diamètre de plus de 2500 mètres.

Ce drainage est établi en pierres plates formant un canal de 10 centimètres de large, et le débit de l'artère principale s'élève, pendant l'hiver, jusqu'à 4000 mètres cubes par vingt-quatre heures. Les eaux obtenues sont gypseuses et inutilisables; aussi a-t-on dû les perdre dans un puits absorbant.

L'artère principale s'étant obstruée par suite d'un affaissement des pierres, M. Mary, inspecteur général des ponts et chaussées, a réparé le mal en démontant le canal et posant sur la marne une couche de mortier hydraulique, destinée à former un radier pour l'empierrement.

Depuis cette opération rien n'a bougé, et les engorgements ne se sont pas reproduits.

Empierrements avec canal. — Lorsqu'on se contente de jeter au fond des tranchées d'assainissement un massif de pierres ou des fascines, l'écoulement se fait avec la plus grande lenteur, puisque l'eau circule dans de petits canaux étroits et tortueux; il faut alors donner aux drains un excès de pente.

Mais si l'on a soin de ménager à la base de l'empierrement un petit canal triangulaire ou rectangulaire en pierres plates, les suintements se réunissent, la fuite des eaux s'établit sans obstacle, l'excès de pente n'est plus nécessaire, et on réalise les mêmes avantages qu'avec les tuyaux.

M. de Villeneuve conseille d'ajouter à ce système d'exécution une dernière précaution. Après avoir égalisé, avec les plus menues pierres, la surface supérieure de l'empierrement, il faut y établir un enduit de mortier hydraulique qui supprime toutes les filtrations verticales, celles qui font naître l'envasement le plus rapide du drain. L'enduit hydraulique supérieur représente très-bien la chape de la voûte d'un pont, et atteint évidemment beaucoup mieux le but indiqué que les tessons recouvrant les drains et que les mottes d'argile ou de gazon qui sont foulées sur les tuyaux.

En ajoutant un peu de mortier hydraulique aux empierrements, on peut obtenir avec ce système tout l'avantage que donne le drainage avec tuyaux, et la dépense du mortier représente à peu près le prix des tuyaux, 7 à 10 centimes par mètre courant.

Toutes les fois que les pierres abondantes seront un embarras pour le laboureur, le drainage perfectionné peut permettre avec succès certain l'emploi de la mauvaise briqueterie ou de l'empierrement. Or, les pierres existent en grande quantité dans le voisinage des sols imperméables provenant des terrains primitifs, des grès secondaires, des marnes intercalées dans les calcaires. Les drainages par empierrement peuvent donc s'appliquer à une grande partie des travaux d'assainissement.

C'est ainsi que dans beaucoup de départements du Midi, et notamment dans la Haute-Garonne, on montre de nombreux exemples de drainages par pierrées.

Les figures 1 de la planche X, montrent les dispositions ordinaires des pierrées. Dans la Sarthe, le prix de revient minimum des pierrées, avec tranchées de $0^m,70$ à $0^m,80$ de profondeur ayant $0^m,15$ à $0^m,20$ au fond et des talus naturels, est de 65 centimes, savoir :

40 centimes pour la fouille et la confection de la pierrée ;

25 centimes pour l'extraction, le cassage et le transport de la pierre.

Signalons, pour n'y plus revenir, les drains en fascines, en tuyaux de bois, en tuyaux de tourbe comprimée et séchée, en gazons, en briques demi-circulaires, et divers autres systèmes aujourd'hui sans usage, et arrivons au véritable procédé de drainage, à l'emploi des tuyaux cylindriques.

DRAINAGE PAR TUYAUX.

Pour décrire méthodiquement et sommairement le procédé du drainage par tuyaux cylindriques, nous diviserons le sujet en trois sections distinctes.

Dans la première, nous exposerons la fabrication des tuyaux et des accessoires du drainage.

Dans la seconde, nous présenterons les études relatives à l'établissement d'un projet complet de drainage : tracé et direction, profondeur, longueur et diamètre des drains.

Dans la troisième section, nous parlerons des travaux d'exécution.

1° FABRICATION DES TUYAUX ET DE LEURS ACCESSOIRES.

La fabrication des tuyaux se fait avec une terre intermédiaire entre la terre à briques et la terre à poterie ; cette terre est moulée au moyen de machines ; puis les tuyaux ayant subi à l'air un commencement de dessiccation sont portés au four.

Choix et préparation des terres. — On trouvera aux pages 252 et suivantes de notre *Traité de l'Exécution des Travaux* la description complète des opérations relatives à la fabrication des briques et des poteries. Le lecteur voudra bien se reporter pour les détails à cette section de l'ouvrage et nous nous contenterons de résumer ici les points principaux.

La base des terres cuites est l'argile plus ou moins pure. Les argiles sont des silicates d'alumine contenant 10 à 12 0/0 d'eau et presque toujours additionnés de sable, d'oxyde de fer, de bitume ou de calcaire.

L'argile plastique est la plus pure ; elle fournit la terre à faïence fine ; puis vient l'argile figuline, qui sert à la fabrication des poteries communes, des briques, etc.

L'argile figuline, moins grasse et moins tenace que l'argile plastique, contient toujours 5 à 6 0/0 de calcaire avec de l'oxyde de fer qui la colore en jaune ou en rouge.

Lorsque la proportion de calcaire augmente, on passe à l'argile marneuse et à la marne.

Par la cuisson, l'argile pure se contracte et se fendille ; le retrait est d'autant plus considérable que l'argile est plus pure ; pour combattre ce retrait, on additionne la pâte d'un peu de sable qui est un dégraisseur. La pâte ainsi dégraissée devient beaucoup moins ductile et on ne pourrait la façonner si on dépassait la proportion convenable.

Il y a donc pour chaque espèce d'argile une expérience à faire, afin de déterminer la proportion de matière dégraissante de telle sorte que le retrait soit sans inconvénients et que le moulage soit cependant facile.

La pâte des tuyaux de drainage doit donner par la cuisson un produit d'un grain plus fin et plus imperméable que la brique ordinaire. Il faut donc choisir avec soin les matières premières.

La terre qu'il convient d'employer et qu'on rencontre en beaucoup de pays est une argile grasse, de la classe des argiles figulines, plus ou moins colorée en rouge ou en jaune par de l'oxyde de fer. Elle doit être plutôt grasse que sablonneuse. Il faut qu'elle ait assez de ductilité pour se pétrir bien sous la main qui la comprime, qu'elle soit savonneuse, un peu rude au toucher et happant à la langue ; qu'elle soit surtout dépouillée de matières salines ou terreuses étrangères à celles qui constituaient son essence, de matières métalliques, végétales et animales, et enfin qu'elle renferme le moins possible de cailloux roulés ou autres corps plus ou moins volumineux et abondants. La présence de morceaux de craie pure dans la pâte est funeste au produit ; par la cuisson, cette craie donne de la chaux qui plus tard s'éteint par l'humidité, et qui, en foisonnant, fait éclater le tuyau ou tout au moins le met hors de service.

Voici, d'après M. Barral, plusieurs compositions de pâte pour tuyaux de drainage :

1° Terre franche (marne argileuse.)	3 parties.
Argile verte (argile plastique un peu sableuse)	6 —
Sable	1 partie.
2° Terre argileuse (argile plastique un peu sableuse)	2 parties.
Rougette (marne limoneuse)	1 partie.
3° Argile figuline	2 parties.
Terre franche	1 partie.

On rencontre quelquefois des terres fortes dont la composition est telle qu'elles peuvent être employées, sans aucun mélange, à la fabrication des tuyaux de drainage.

Préparation des terres. — C'est peut-être l'opération la plus importante pour une bonne fabrication, puisqu'elle a pour but de donner à la matière tout le liant nécessaire et de la débarrasser de tous les corps étrangers qui rendraient les tuyaux défectueux.

La préparation des terres se fait comme nous l'avons indiqué à la page 257 de l'*Exécution des Travaux :* les terres sont fouillées et humectées à l'automne dans des fosses spéciales où elles passent l'hiver ; on les pioche et on les remue de temps en temps pour éviter un tassement qui soustrairait les parties inférieures aux influences atmosphériques.

Cette exposition préliminaire de la terre extraite en automne est essentielle et ne doit pas être négligée dans la pratique.

Après l'hivernage, au mois d'avril, on pétrit la terre, on procède au foulage ou malaxage.

L'ancienne méthode du foulage, le marchage de la pâte, consistait à étendre la terre dans une fosse, en l'arrosant et l'épluchant avec soin; puis les ouvriers se mettaient à marcher sur cette terre avec les pieds nus et à la fouler méthodiquement, en ajoutant tantôt de l'eau, tantôt de la glaise, jusqu'à ce que la couche de boue atteignît une hauteur de $0^m,30$ à $0^m,40$.

Toutes les fois qu'un marcheur sent sous son pied un petit caillou ou un grumeau, il doit avoir soin de l'enlever, et c'est là un des avantages de l'opération du marchage lorsqu'elle est bien faite.

La quantité d'eau à employer dépend de la nature de la terre; il faut que la pâte soit amenée à la consistance d'une pâte ferme de farine.

Dans les fabriques spéciales, devant pourvoir à un grand débit, le marchage est remplacé par le malaxage; cette opération s'exécute au moyen d'un tonneau broyeur identique au tonneau à mortier. Nous n'avons donc pas besoin de décrire l'appareil.

Quelquefois le tonneau à mortier est remplacé par le broyeur; il se compose de deux cylindres en fonte à axe horizontal, tournant en sens inverse, et plus ou moins écartés l'un de l'autre, suivant la finesse de la pâte que l'on veut obtenir. Au-dessus est une trémie par où la terre humectée descend entre les deux cylindres. Cet appareil est un véritable laminoir. Le broyeur ne doit pas laisser échapper de graviers, dont le diamètre soit supérieur à 1 ou 2 millimètres.

Un moulin broyeur, mû par un cheval, peut fournir chaque jour la pâte nécessaire à la confection de 20 000 petits tuyaux.

Généralement, on arrive à trouver une terre dépourvue de cailloux, et le marchage ou le malaxage au tonneau suffisent, sans qu'il soit besoin de recourir au broyeur.

Moulage des tuyaux. — La première chose à faire était de déterminer

quelle forme on donnerait à la section des tuyaux. On a préconisé la section intérieure elliptique ou ovoïde, parce que, à volume égal, la hauteur d'eau y est plus grande que dans la section circulaire, et que par suite l'écoulement doit mieux se faire; mais c'est là une précaution inutile. De même, on a voulu, pour donner plus de stabilité au tuyau, figure 2, planche X, le munir d'une semelle plate, cela complique la fabrication et augmente les prix sans aucun avantage.

Pour être assuré d'établir les files de tuyaux bien exactement en ligne droite, on a proposé des tuyaux à renflement, analogues aux tuyaux des distributions d'eau, et on a employé de petits manchons pour réunir l'un à l'autre les tuyaux consécutifs, figure 2, planche X.

Ces perfectionnements, sauf les manchons, n'ont pas été adoptés, et on se contente presque partout de tuyaux cylindriques placés bout à bout. En général, les tuyaux reposent sur un fond très-solide, et il n'y a pas à craindre de les voir s'enfoncer; les déviations horizontales sont seules à redouter, mais en réglant convenablement le fond de la tranchée au moyen d'un mandrin qu'on y traîne, en posant les tuyaux avec soin, en les calant latéralement et les recouvrant avec la main de terre et de gazons, on obtient d'excellents résultats, et la continuité des files ne s'altère pas. Nous n'avons donc à nous occuper que du tuyau cylindrique.

Il se fabrique à la machine.

Les machines à fabriquer les tuyaux sont très-nombreuses, beaucoup d'entre elles se ressemblent, et il est peu utile de les décrire; on les trouvera presque toutes dans le *Traité du Drainage* de M. Barral. Elles sont continues ou discontinues; ces dernières sont à piston; dans les premières la pâte est chassée soit par une vis, soit par un laminoir.

Le principe des machines à piston ou machines discontinues est représenté par la figure 3, planche X.

La pâte argileuse est mise en *a* dans un cylindre en fonte; un piston *p* la surmonte, et par la pression qu'il exerce la chasse dans le vide annulaire *oo*, compris entre un mandrin *m* et un tuyau en fonte. L'embouchure du vide annulaire est évasée; le mandrin n'est relié au tuyau en aucun point; mais, comme il faut bien qu'il soit maintenu quelque part, il est relié par sa tête à la traverse *n* qui est fixée à la base du cylindre contenant la pâte. Cette traverse n'a pas d'épaisseur; elle s'étend surtout dans le sens longitudinal; elle coupe la pâte qui s'agglomère à nouveau lorsqu'elle l'a dépassée. Sous le pourtour du piston est une petite corde *c*, qui empêche l'argile de remonter entre le cylindre et le piston.

Parmi les machines discontinues, la figure 4, planche X, représente une des plus répandues : une grande roue dentée *r* est mue par une manivelle à bras; sur son arbre est un pignon *s*, qui transmet le mouvement à une seconde roue *t*, laquelle porte un pignon qui fait avancer une crémaillère *c*. Cette crémaillère est la tige du piston *p* qui se meut dans la caisse prismatique *a*; cette caisse, fermée par un couvercle à charnière et à verrou, reçoit la pâte préparée, et cette pâte est chassée par le piston dans la filière. Pour les petits tuyaux, la filière porte quatre trous disposés comme le montre la figure 5; l'argile passe à travers les vides annulaires, et les tubes qui sortent de la filière sont reçus par des toiles sans fin *g*. Quand les files de tuyaux occupent toute la longueur des toiles, on rabat dessus une sorte de gril transversal, dont les fils métalliques, régulièrement espacés, coupent les tuyaux à la longueur voulue.

Le bâti de la machine est en fonte et monté sur quatre roues, de sorte qu'elle se déplace sans difficulté.

Les tuyaux coupés sont enlevés par des enfants au moyen du râtelier de la figure 7.

Les orifices que l'on veut obtenir sur un certain nombre de tuyaux sont faits à la main, pendant que ces tuyaux sont encore frais.

La machine précitée produit 350 à 400 tuyaux à l'heure, elle coûte 600 francs.

La machine d'Ainslie est à fabrication continue; elle comprend deux cylindres lamineurs posés l'un au-dessus de l'autre, et laissant entre eux un certain vide; à gauche du laminoir est un plan incliné formé par une toile sans fin, sur laquelle on jette la pâte préparée. Les cylindres entraînent la pâte et la foulent en avant dans une boîte dont la face antérieure est fermée par une filière. La pâte s'écoule par la filière, et les tuyaux sont reçus par une toile sans fin; on les coupe de longueur au moyen d'un système de fils métalliques. Avec le petit modèle de cette machine, coûtant 600 francs, on fait 400 à 500 tuyaux à l'heure. Avec le grand modèle, coûtant 1000 francs, on en fait 1500.

Avec la petite machine, il suffit d'un homme à la manivelle et de deux enfants, l'un pour engrener la pâte, l'autre pour enlever les tuyaux.

Avec la grande machine, il faut deux hommes à la manivelle, un homme pour apprêter la pâte et trois enfants.

Le type des machines à vis d'Archimède est la machine de MM. Randell et Saunders (fig. 6).

Nous avons déjà rencontré plusieurs fois la vis d'Archimède; c'est un moyen puissant de transport, d'élévation et de pression.

Imaginez un cylindre vertical en fonte, dans l'axe duquel est un arbre en fer forgé qui porte deux hélices de même sens *a*, *a*; à la partie supérieure du cylindre on jette la pâte préparée; elle est prise par la vis et descend à mesure que celle-ci tourne. Elle est chassée vers le fond avec une pression qui dépend du pas de l'hélice; au fond du cylindre, sur les côtés, sont disposées deux ou plusieurs filières, par où sortent les tuyaux étirés; on les coupe et on les enlève, comme nous l'avons déjà expliqué.

Dans certaines machines, la vis est horizontale au lieu d'être verticale; cette dernière position est préférable, parce que les pressions sont alors également réparties dans toute la section du cylindre.

La puissance d'une machine de ce genre peut être très-considérable, ainsi qu'on le comprend sans peine; elle peut être mue par une machine à vapeur et convient surtout aux grandes exploitations.

Nous n'insisterons pas davantage sur les machines à tuyaux : les trois exemples précédents suffiront à faire comprendre tous les systèmes.

Dans la plupart des machines on a soin d'interposer entre la filière et le piston un grillage métallique fin, destiné à arrêter les graviers et les grumeaux. On a soin, du reste, de rejeter les tuyaux défectueux.

Séchage des tuyaux et cuisson. — Le séchage des tuyaux se fait à l'air. Les tuyaux sortant de la machine sont placés sur des claies, dont on forme des étagères, que l'on protége contre la pluie par une toiture. Le tout se démonte facilement, c'est-à-dire que les claies rectangulaires portent sur leurs petits côtés des faces verticales; c'est sur ces faces verticales que l'on pose la claie du dessus, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive à la toiture.

Lorsqu'ils commencent à se dessécher, les tuyaux s'affaissent; aussi vient-on les reprendre au bout d'un jour ou deux, lorsqu'ils sont encore fermes; on in-

troduit à l'intérieur un mandrin en fer que l'on tient à la main et on roule le tuyau sur une table lisse, afin de lui donner à l'intérieur une forme exactement cylindrique.

Dans les grandes exploitations, on installe sous des hangars spéciaux, fermés du côté des vents régnants, de nombreuses étagères en bois blanc, à claire-voie, sur lesquelles on emmagasine les tuyaux. Pendant le hâle, on a soin de les retourner de temps en temps, afin d'obtenir une dessiccation uniforme.

Les tuyaux de grand diamètre ont assez de consistance pour être séchés debout sur une aire en sable. Dans beaucoup de fabriques, on se contente de sécher même les petits tuyaux sur une aire en sable et on les retourne fréquemment.

Il est avantageux de prolonger le plus possible la dessiccation à l'air libre.

Lorsqu'elle est terminée, il faut procéder à la cuisson, qui a pour objet de chasser la dernière eau et de faire du tuyau une véritable poterie.

La cuisson se fait dans des fours à coupole; les fourneaux ou alandiers sont placés latéralement, et les produits de la combustion traversent la masse.

Pour une exploitation passagère, on construit des fours en terre franche avec foyers en briques. Un four circulaire de $3^m,30$ de diamètre et de $2^m,15$ de hauteur coûte 150 francs et peut recevoir 30 000 tuyaux de $0^m,035$ de diamètre. La cuisson dure 36 heures. Il faut laisser refroidir la masse pendant un temps au moins égal avant de défourner.

Les tuyaux sont généralement placés debout, ce qui active le tirage et facilite la cuisson.

Lorsqu'on cuit ensemble des tuyaux de différent diamètre, les petits sont placés dans les grands afin de ménager l'espace.

Pour les petits tuyaux ordinaires, de $0^m,05$ à $0^m,045$ de diamètre intérieur, on adopte une épaisseur de $0^m,02$; pour des tuyaux de $0^m,05$ à $0^m,11$, l'épaisseur est de $0^m,03$; pour des tuyaux de $0^m,16$ elle est de $0^m,04$.

Il est important de surveiller la cuisson avec le plus grand soin; lorsqu'elle est imparfaite, le tuyau conserve une couleur sombre, il manque de sonorité, il se délite et s'exfolie par l'humidité et la gelée, il manque de résistance et donne un mauvais travail. C'est une économie fort mal placée, car elle est insignifiante par rapport au prix total du drainage et elle gâte toute l'opération.

Si la cuisson est poussée trop vivement ou trop loin, il y a commencement de vitrification; les tuyaux se déforment et se soudent les uns aux autres; en même temps on perd beaucoup de combustible.

Les tuyaux ordinaires de $0^m,035$ de diamètre intérieur et d'un pied ou de $0^m,33$ de longueur pèsent chacun 1 kilogramme environ. Ce poids varie du reste dans de grandes proportions, suivant la nature des terres. Le prix de revient d'un millier de ces petits tuyaux est de 17 à 22 francs, pris au four.

Des tuyaux de $0^m,045$, $0^m,095$, $0^m,14$ de diamètre intérieur et de $0^m,38$ de longueur, coûtent, pris au four, 35, 80 et 140 francs le mille. Ces chiffres sont, on le conçoit, très-variables avec les pays.

Voici comment le jury de l'Exposition de 1855 définissait un bon tuyau de drainage :

« Un bon tuyau de drainage doit avoir de $0^m,30$ à $0^m,35$ de longueur, et son diamètre intérieur, variable avec la quantité d'eau dont il doit assurer l'écoulement, ne doit guère descendre au-dessous de $0^m,03$. Il doit y avoir absence de rugosités ou de bavures dans l'intérieur, particulièrement aux deux extrémités dont la coupe doit être nette et droite. Quand on frappe deux tuyaux l'un

contre l'autre, on doit entendre un son clair et argentin, qui dénote une cuisson bien complète, l'absence de fissures et de pores trop nombreux, dans lesquels s'introduirait l'eau, pour exercer une détérioration lente sans doute, mais fatale. Le plus souvent, les terres avec lesquelles les tuyaux sont fabriqués sont marneuses et contiennent du carbonate de chaux. Si le calcaire est en grains assez forts, si le broyeur et le malaxeur n'ont pas réduit ces grains en parcelles très-fines, si le crible n'a pas arrêté les trop gros au passage, il en résulte que, pendant la cuisson des tuyaux, ils se réduisent en chaux caustique et laissent un vide autour d'eux, un pore qui plus tard se remplira d'eau. Alors la chaux s'hydratant augmentera de volume et causera la friabilité de la poterie. Les pyrites existant dans les terres employées, en se sulfatisant plus tard, produiront le même effet que la chaux. »

Accessoires du drainage. — Les principaux accessoires du drainage sont les bouches de décharge ou d'évacuation et les regards.

Bouches de décharge. — Les collecteurs aboutissent à un ruisseau, à un fossé ou au pied d'un talus. La bouche d'évacuation doit être établie avec certaines précautions et constamment surveillée.

En principe, il faut réduire autant que possible le nombre des bouches, car ce sont de petits ouvrages d'art assez coûteux à établir.

Il est difficile de faire déboucher tous les drains élémentaires dans un fossé, parce que leurs orifices seraient vite obstrués par les terres et par la végétation. Il faudrait les visiter et les nettoyer fréquemment.

En tête de chaque tuyau émissaire doit se trouver un grillage qui s'oppose au passage des rats, des mulots, des grenouilles, etc.; ces animaux s'engageant dans le drain et pouvant y mourir arrêteraient l'écoulement. Avec quelques fils de fer, il est facile d'établir un grillage.

Pour éviter de voir briser par les passants le bout de tuyau qui débouche dans le fossé d'évacuation, on a quelquefois terminé le collecteur par un tuyau de fonte de même diamètre.

Mais on peut, en général, protéger suffisamment le débouché en garnissant le pourtour du tuyau de grosses pierres, dont une forme plate-bande supérieure, une seconde forme radier et deux autres forment des piédroits, figure 8, planche X.

Dans un drainage important, on a recours pour les collecteurs principaux à des bouches en maçonnerie : on les visite fréquemment afin de reconnaître la manière dont le drainage fonctionne.

La fig. 10 de la planche X, donne la coupe et l'élévation d'une bouche ouvrant dans un fossé. C'est une véritable tête d'aqueduc avec son radier et ses deux rampants.

M. l'ingénieur J. Lemoyne recommande l'emploi d'une bouche de drainage plus économique, figure 9, planche X :

« Cette bouche, dit-il, n'est autre chose qu'un tuyau en grès de $0^m,30$ de longueur, dont la moitié est du diamètre voulu pour emboîter exactement le drain collecteur. L'autre moitié est de diamètre moindre, ou bien il y a simplement un bourrelet intérieur vers le milieu du tuyau, ce qui produit dans les deux cas une sorte de feuillure; on y place une petite grille en fil de fer galvanisé, ou en fonte, qui est maintenue en place par le drain même auquel est adaptée la bouche.

« Ces bouches se font très-facilement au tour à potier, et on leur donne une épaisseur de $0^m,02$ à $0^m,03$, ce qui les rend assez lourdes pour avoir beaucoup

de stabilité, d'autant qu'elles font corps, pour ainsi dire, avec le dernier drain. Elles sont d'ailleurs cuites au grès et d'une solidité comparable à celle du granit; il faudrait un choc très-violent pour les détériorer. »

Regards. — Aux points de rencontre de deux ou de plusieurs collecteurs, on place ce qu'on appelle des regards, sortes de cuves verticales dans lesquelles débouchent les tuyaux qui amènent l'eau de l'amont et ceux qui la conduisent à l'aval.

Les regards sont d'ordinaire formés de plusieurs manchons en poterie, de $0^m,20$ à $0^m,50$ de diamètre, superposés par emboîtement, et fermés haut et bas soit par une pierre plate, soit par une tuile, soit par une forte planche en cœur de chêne. La figure 9 de la planche XI représente un regard de $0^m,30$ de diamètre, dans lequel débouchent les deux branches d'amont et d'aval d'un collecteur.

Les tuyaux d'amenée sont au-dessus du tuyau d'aval, afin qu'il existe une chute dans le regard et qu'on puisse se rendre un compte exact de la manière dont le drainage fonctionne. C'est deux ou trois jours après une grande pluie que l'on peut venir vérifier l'écoulement; si l'écoulement est arrêté quelque part, l'inspection des regards permet de préciser la section défectueuse. La dalle supérieure des regards doit être à $0^m,50$ au-dessous du sol, afin de ne pas être exposée aux chocs de la charrue. Il convient de repérer la position des regards au moyen de bornes fixes posées dans les champs; ces bornes donnent en outre les alignements des collecteurs.

On remarquera que les tuyaux font saillie à l'intérieur du regard, afin de constituer un larmier et d'éviter les ruissellements le long des parois.

Les regards et les tuyaux qui y débouchent sont du reste maintenus par de solides enrochements.

Lorsqu'on veut construire des regards très-importants, on les fait en maçonnerie de pierres sèches, figure, 9 planche XII. On a de la sorte un véritable puisard qu'on peut laisser découvert et qui peut servir à l'alimentation des hommes ou des bestiaux; il constitue une source artificielle.

On trouvera les prix des regards dans une note subséquente relative au drainage des bourgs de la Motte-Beuvron et de la Ferté-Saint-Aubin (Sologne).

2° ÉTUDES RELATIVES A UN PROJET DE DRAINAGE.

Opérations préliminaires sur le terrain. — Lorsqu'il s'agit de dresser un projet de drainage, la première opération à faire est d'obtenir la représentation exacte du relief du terrain. — Sans doute on peut exécuter un drainage et en faire le tracé directement sur le terrain sans avoir levé le plan ni fait le nivellement; mais on s'expose ainsi à commettre de grosses erreurs, surtout dans les terrains dont le relief est peu accusé, et on marche presque toujours au hasard.

Il est avantageux à tous égards de lever un plan exact du terrain et de le représenter par les courbes de niveau, espacées de $0^m,10$, de $0^m,20$ ou de $0^m,50$, suivant que les pentes du sol sont plus ou moins rapides.

Le lever du plan et le nivellement doivent se faire par les méthodes les plus simples; la chaîne, l'équerre et le niveau d'eau peuvent suffire; mais, pour

aller vite, il vaut mieux recourir au niveau à lunette. En effet, il ne s'agit pas d'opérations de précision, et une erreur de quelques centimètres ne peut avoir grande influence, excepté dans certains cas où les pentes sont tellement faibles qu'il faut les ménager précieusement.

Mais nous n'insisterons pas sur ce sujet, et nous renverrons le lecteur à notre *Traité de Géodésie.*

Tracé et direction des drains. — C'est sur le plan avec courbes de niveau que l'on trace les drains et les collecteurs. C'est aussi sur ce plan que se fait le métré, car on n'a qu'à prendre à l'échelle la longueur des drains et des tranchées de chaque espèce ; on applique à ces longueurs les prix élémentaires, et le détail estimatif des dépenses est bien vite établi.

Il est rare que la direction des drains soit indifférente, à moins que le terrain ne soit sensiblement horizontal ; dans ce cas il faut, pour rendre l'écoulement possible, établir la pente sur le fond de la tranchée, que l'on fait moins profonde à l'amont qu'à l'aval.

En somme, c'est la pesanteur qui détermine l'écoulement de l'eau, et il faut placer les drains dans une position telle que la pesanteur ait son maximum d'effet et exerce son action le plus uniformément possible.

C'est pourquoi, dès que le terrain présente des ondulations sensibles, il convient de placer les drains à peu près suivant les lignes de plus grande pente. De la sorte, leur action est la même à droite et à gauche, et la vitesse d'écoulement est maxima.

Les drains dirigés suivant les lignes de plus grande pente ont en outre l'avantage de couper les assises de suintement, assises sableuses ou marneuses, qui, si elles n'étaient coupées par les drains, affleureraient le sol entre deux files de tuyaux et se signaleraient par des taches humides sur la surface du terrain à dessécher.

Ainsi, les drains élémentaires doivent être à peu près dirigés suivant des lignes de plus grande pente ; or, comme leurs lignes sont établies par faisceaux parallèles, cela revient à dire qu'on examine avec soin le plan avec courbes de niveau et qu'on divise ce plan en une série de surfaces à peu près planes ; à chacune de ces surfaces correspond un faisceau de drains parallèles. La figures 1 des planches XII et XIII permet de saisir nettement cette manière d'opérer.

Il va sans dire que la règle n'est pas absolue et que, dans certains cas, on pourra s'éloigner des lignes de plus grande pente ; s'il s'agit, par exemple, de vignes, les files de drains seront parallèles aux lignes de ceps ; il est vrai qu'en général ces dernières sont dirigées suivant la pente.

Dans certains cas, lorsque les parties basses d'un versant sont plus humides que les parties hautes, on adoptera des lignes de drains disposées en éventail.

Les drains secondaires se rejoignent dans des collecteurs secondaires et ceux-ci portent leur tribut aux collecteurs principaux.

Les collecteurs principaux occupent l'emplacement des lignes de thalweg ; les collecteurs secondaires ont des directions quelconques. En général, chacun d'eux correspond à un faisceau de drains parallèles.

Les collecteurs secondaires sont établis à $0^{m},05$ au-dessous des drains élémentaires ; ceux-ci doivent faire un angle obtus avec le sens de l'écoulement, et il convient d'adopter pour cet angle la valeur de 120°, afin de faciliter l'écoulement.

A la rigueur, les drains peuvent par tolérance rencontrer le collecteur normalement ; mais c'est déjà une disposition vicieuse, et jamais on ne devra admettre

que la rencontre se fasse sous un angle aigu, puisque alors le courant qui s'échappe du drain tendra à remonter le collecteur.

Lorsque la direction des drains et du collecteur est forcée, on fait le raccordement au moyen de parties courbes ou plutôt polygonales, puisqu'elles sont établies avec des bouts de tuyaux droits. Le rayon de ces courbes doit être d'au moins 5 mètres, et il faut y forcer la pente afin d'éviter les engorgements.

D'après M. Mangon, il convient d'établir un collecteur secondaire de $0^m,04$ à $0^m,06$ de diamètre pour recevoir le produit des petits drains de 2 à 4 hectares.

Les collecteurs secondaires vont s'embrancher dans les collecteurs principaux, et on place des regards aux points d'embranchement ainsi que nous l'avons dit.

Sur tout le périmètre de la surface à drainer on établit un drain de ceinture, destiné à arrêter les eaux des fonds supérieurs. Le drain de ceinture doit de place en place communiquer avec un drain ordinaire dans lequel il déverse ses eaux.

Longueur des drains. — On conçoit que les drains ne peuvent prendre une longueur indéfinie, en conservant le même diamètre ; car à mesure qu'on descend le cours d'un drain, la quantité d'eau qu'il reçoit augmente et il devient incapable de la débiter. L'assèchement ne se fait plus alors d'une manière suffisante.

« Les drains de dernier ordre, dit M. Hervé-Mangon, de $0^m,03$ à $0^m,035$ de diamètre, ne doivent pas avoir en général plus de 250 à 330 mètres de longueur, et même moins si leur pente est très-faible, quand leur écartement n'excède pas les chiffres ordinairement adoptés.

Cette limite, parfaitement vérifiée par la pratique, quand il ne s'agit pas, bien entendu, de terrains traversés par des eaux de source, s'accorde avec les indications du calcul, en admettant qu'il suffit qu'un drain puisse débarrasser le sol en 24 heures d'une couche d'eau de $0^m,01$ tombée sur l'étendue de terrain qu'il doit assainir. »

Lorsqu'un versant a une longueur supérieure à 250 ou 300 mètres, il faut donc couper les lignes de drains par des collecteurs secondaires comme le montre la figure 9 de la planche III .

Pente des drains. — L'écoulement se fait bien, même dans les petits drains, avec une pente faible, et c'est là un avantage sérieux du procédé de drainage par tuyaux.

On peut à la rigueur se contenter d'une pente de $0^m,001$ par mètre. — Il faut éviter les variations brusques de pente qui se traduisent par des chocs capables de dégrader les tuyaux et les tranchées.

De même, on doit éviter les pentes trop rapides, surtout sur les collecteurs : dans ce cas, on profite des regards pour y créer des chutes qui rachètent l'excès de différence de niveau.

M. Mangon recommande d'adopter des pentes qui aillent en croissant de l'amont à l'aval, afin que la vitesse s'accélère à mesure qu'augmente le volume à débiter et afin que les particules solides entraînées ne viennent pas à se déposer lorsque la vitesse se ralentit.

Cette condition est presque toujours impossible à réaliser et, au contraire, les pentes diminuent de l'amont à l'aval. On balance cette diminution de pente par un accroissement de section des collecteurs, et on établit aux changements de pente des regards où s'accumulent les matières entraînées. Du reste, dans un

drainage bien exécuté, il ne doit jamais couler d'eau trouble et les dépôts vaseux ne sont guère à craindre.

Diamètre des tuyaux. — Le diamètre minimum des drains est de $0^m,03$; d'ordinaire, le diamètre des petits drains du commerce est de $0^m,035$.

En appelant r le rayon d'un tuyau, i sa pente par mètre, u la vitesse moyenne d'écoulement, q son débit à la seconde, et en admettant pour coefficient de la résistance dans des tuyaux depuis longtemps en service le nombre 0,002, notablement supérieur à celui qu'indiquent les expériences de Darcy, on a les deux relations :

$$(1) \qquad ri = 0{,}002u^2 \qquad\qquad (2) \qquad q = \pi r^2 u.$$

Prenons un tuyau de $0^m,035$ de diamètre ayant la pente minima de $0^m,001$, l'équation (1) nous donnera pour la vitesse la valeur

$$u = 0{,}095.$$

et le débit à plein tuyau sera de 9 centilitres par seconde, soit 7776 litres par 24 heures.

Le drain dont il s'agit étant à faible pente, aura au plus 250 mètres de longueur ; si l'écartement est de 10 mètres, il correspond à une surface de 2500 mètres carrés.

Sous le climat du nord de la France, les pluies qui donnent $0^m,01$ de hauteur d'eau en 24 heures sont rares et celles qui en donnent $0^m,02$ à $0^m,03$ sont exceptionnelles ; on les remarque surtout en été, c'est-à-dire à l'époque où la terre a sa plus grande faculté d'absorption, en même temps que l'évaporation est à son maximum.

Considérons donc une pluie de $0^m,01$; elle versera sur la surface correspondant au drain qui nous occupe 25 mètres cubes d'eau en 24 heures. — En trois jours, le drain pourra débiter tout ce volume : le plan d'eau s'élèvera donc dans le sous-sol, mais d'une manière momentanée et non dangereuse, et l'assainissement ne se fera pas attendre.

M. Hervé Mangon a souvent calculé le diamètre des drains en prenant comme point de départ qu'ils doivent débiter en 36 heures la moitié environ de la quantité d'eau versée en 24 heures sur la surface considérée par les fortes pluies du pays.

L'exemple précédent suffira à guider le lecteur dans tous les calculs du même genre.

On admet que, sous le climat du nord et du centre de la France, un tuyau de $0^m,07$ de diamètre peut recevoir les eaux d'une surface de 2 à 3 hectares.

Profondeur et écartement des drains. — La profondeur et l'écartement des drains sont deux quantités corrélatives.

Étant donnée la profondeur à laquelle on veut maintenir le plan d'eau en tous les points de la surface à assainir, les drains doivent se trouver au moins à cette profondeur. Mais si on les plaçait juste à cette profondeur, il faudrait en rapprocher les files outre mesure ; en effet, le plan d'eau ne reste pas horizontal entre deux drains, il se déforme, et sa surface ne peut mieux se comparer qu'à celle d'un toit dont le faîte est parallèle aux deux drains et situé au milieu de leur intervalle, et dont les versants sont régulièrement inclinés vers les drains. — C'est grâce à cette pente que l'eau prend son mouvement vers les drains.

D'après cela, on comprend que si les drains sont à une faible profondeur, on

devra en rapprocher les files; au contraire, à mesure que la profondeur augmentera, le champ de leur action s'étendra et l'écartement des files pourra être augmenté.

Avantage des drains profonds. — L'avantage des drains profonds à grands écartements est généralement reconnu.

L'atmosphère, disait M. Parkes en 1850, est un immense réservoir d'engrais et celui qui nous les donne à plus bas prix. Comment pourrait-on, dès lors, hésiter à lui faciliter l'accès du sol cultivable, et cela le plus profondément possible ?

L'assainissement superficiel d'une terre argileuse ne produit jamais que de médiocres résultats; il n'enlève que la couche superficielle d'humidité; il n'empêche pas les eaux pluviales de s'accumuler dans le sous-sol et de remonter jusqu'à la surface par un effet de capillarité ; la terre reste froide et compacte, les conditions de la végétation ne sont pas sensiblement améliorées. L'action de capillarité suffit à relever les eaux de $0^m,45$ et plus ; des rigoles creusées à $0^m,40$ ne peuvent donc produire d'effet utile que pour enlever les flaques d'eau stagnante, elles ne sauraient donner les résultats du drainage. Plus la nappe d'eau sera abaissée dans le sous-sol, plus l'amélioration produite par les drains sera considérable, et, sous le rapport de l'efficacité, le drainage profond l'emporte sur le drainage à faible profondeur. — Au point de vue économique, il y a aussi avantage à exécuter des tranchées moins nombreuses et plus profondes, à moins qu'on ne rencontre des sols rocheux, auquel cas il faut bien se résigner à placer les drains à de faibles profondeurs.

Dans ces conditions, des drainages de $0^m,40$ de profondeur pourrontsuffire, mais on s'expose à voir les drains envahis par les racines des plantes ; cependant quelques vignes de Sologne ont été drainées à seulement $0^m,40$ et l'opération a réussi. C'est que les racines de la vigne fuient l'eau et se gardent bien par conséquent de pénétrer dans les tuyaux.

Mais, d'une manière générale, il y a avantage à ameublir le sol sur une hauteur aussi grande que possible ; l'action oxydante de l'air atmosphérique s'étend alors fort loin sur toutes les matières minérales utiles à la végétation, enfouies dans la terre ; la chaleur solaire, à laquelle l'air sert de véhicule, pénètre dans le sous-sol et s'y accumule au grand profit de la végétation. Les labours profonds et le défoncement deviennent possibles en tout temps ; les plantes vont chercher leur nourriture jusque dans les couches inférieures; les drains eux-mêmes sont à l'abri de tout choc et de tout engorgement et n'ont rien à redouter des gelées; les drains profonds ameublissent une épaisse couche du sol et lui permettent d'emmagasiner le produit des grandes pluies ; jamais l'eau ne coule à la surface; elle pénètre à l'intérieur, l'imbibe et constitue pendant la saison sèche une réserve d'humidité bienfaisante, qui empêche les plantes de dépérir.

Les figures 9 à 11 de la pl. XI représentent, d'après M. l'ingénieur Bellegarde, l'effet produit par les divers écartements. Supposons que l'on veuille abaisser le plan d'eau à $0^m,60$ au moins au-dessous du sol ; cette hauteur de $0^m,60$ existera au milieu de l'intervalle entre deux drains, et la surface de la couche humide ira en s'inclinant de ce point vers les drains. Supposons qu'il faille pour l'écoulement une pente transversale de $0^m,10$ par mètre, cela donnera une profondeur de $1^m,10$, pour les drains si on adopte un écartement de 10 mètres. — Avec un écartement de 20 mètres, figure 9, la profondeur des tranchées n'atteindra que $1^m,60$ et il y en aura moitié moins. La surface de terrain desséché sera en outre de 22 mètres carrés par section transversale au lieu de 17 mètres. — A

moins qu'on ne se trouve sur un terrain rocheux, on dépensera beaucoup moins pour exécuter une tranchée de $1^m,60$ qu'une tranchée de $1^m,10$; on emploiera moins de tuyaux et de main-d'œuvre. — Tout est donc avantage.

Avec les tranchées profondes, on est plus assuré de couper toutes les stries, toutes les surfaces d'écoulement qui se rencontrent dans le sous-sol.

Dès 1837, dit M. Bellegarde, M. Primmer reconnaissait qu'il existait dans les terrains, à certains profondeurs, des espèces de sillons naturels qui ont, en général, des directions déterminées (direction des courants diluviens), et dès lors il avait conjecturé que l'existence de ces sillons devait avoir une grande influence dans la question du drainage.

Ces sillons plus ou moins compactes, plus ou moins filtrants, se rencontrent dans tous les terrains de sédiments : il faut autant que possible les couper et ne pas établir les drains dans un sens qui leur soit parallèle. — Cela n'est pas à craindre dans la plupart des cas ; cependant, cette circonstance pourrait se présenter dans les drainages à grands écartements : alors, si l'on avait quelques craintes et si on voyait que l'opération ne donne pas tous les résultats qu'on en attendait, on pourra, comme le montre la figure 8, exécuter transversalement aux drains des tranchées que l'on rebouchera ensuite, et grâce auxquelles les eaux pourront toutes se rendre vers les drains.

Mais, si l'on était certain d'être forcé de recourir à cet expédient, il serait évidemment préférable de doubler dès l'origine le nombre des files de tuyaux.

La profondeur moyenne des drains est d'ordinaire de $1^m,10$; l'écartement varie suivant les terrains, de 8 à 16 mètres ; souvent on adopte un écartement de 12 mètres.

Nécessité des sondages préalables. — Nous rappellerons ici que tout projet de drainage doit être précédé de sondages assez multipliés pour qu'on se rende un compte exact de la nature du sous-sol. — En général, on n'a pas besoin de recourir aux tarières et autres appareils de sondage ; il vaut mieux exécuter des fouilles et reconnaître *de visu* la nature et l'épaisseur des assises superposées. C'est un élément important pour déterminer la profondeur et l'écartement des drains.

Les expériences sur la forme que prend la surface des eaux entre deux files de drains sont peu nombreuses. Nous citerons seulement celles qu'a exécutées en Sologne M. l'ingénieur Delacroix. En voici la description.

Expériences sur la position du plan d'eau dans le voisinage des drains. — Il serait fort important de connaître comment les drains agissent sur le plan d'eau dans les divers terrains et jusqu'à quelle distance leur action peut s'étendre. L'écartement à donner aux drains se trouverait par là déterminé.

Malheureusement, les expériences sur l'action des drains sont peu nombreuses. — Les seules que nous connaissions sont celles qu'a faites en Sologne M. l'ingénieur Delacroix et voici le procédé qu'il a employé pour déterminer chaque jour le niveau de la nappe d'eau aux environs des drains :

« Des tubes en tôle percés de trous ont été placés verticalement dans le sol, suivant des lignes perpendiculaires aux drains, à une profondeur égale à celle des tuyaux ; ils ont été espacés de 5 mètres l'un de l'autre et sont au nombre de 8, de sorte que le dernier est à 40 mètres du drain. Les observations des tubes étaient faites quotidiennement, au moyen de baguettes plongées jusqu'à la rencontre de l'eau. Les profondeurs ainsi obtenues étaient rattachées à la partie supérieure des tubes, et par suite à la ligne de drains ainsi qu'au terrain. »

Les expériences ont porté sur deux drains placés dans des terrains différents.

Le premier comprenait, sur 1 mètre d'épaisseur, de la terre végétale sur un sable gris et jaune un peu argileux, puis, sur 0^m,25, un sable jaune argileux et au-dessous l'argile.

Le second comprenait, sur 0^m,50 d'épaisseur, de la terre végétale, puis, sur 0^m,50, un sable jaune caillouteux mêlé d'argile, et au-dessous du sable jaune et gris argileux et graveleux.

La figure 4 de la planche IX représente la coupe verticale des terrains, ainsi que le résultat des expériences.

Elle prouve d'abord que le plan d'eau se déforme et se creuse de chaque côté des drains, par l'effet combiné de la pesanteur qui entraîne les molécules liquides vers le drain, et de la résistance du sol qui les retarde dans leur marche.

Les profils montrent aussi que la déformation du plan d'eau dépend non-seulement de la nature du terrain, mais encore de l'état hygrométrique de la saison. Dans le terrain numéro 1, la pente totale sur une longueur de 35 mètres était de 0^m,538 en avril et tombait à 0^m,184 en juillet ; dans le terrain numéro 2, la pente totale qui était de 0^m,533 en janvier, tombait à 0^m,03 en juillet. Si donc on voulait déterminer par une formule l'écartement des drains, il ne faudrait pas prendre un coefficient constant suivant la nature du terrain, il faudrait tenir compte, en outre, de l'époque de l'année pour laquelle on veut réaliser un assainissement donné.

L'influence de la nature du terrain sur la déformation du plan d'eau est mise en évidence par les figures : dans le terrain numéro 1, pour lequel la nature du terrain ne varie guère jusqu'à la profondeur du drain, la déformation est régulière et la ligne du plan d'eau est presque droite ; dans le terrain numéro 2, la pente est plus considérable entre les tubes 1 et 4 qu'entre les tubes 5 et 8, cela tient à ce que le sable argileux de la partie supérieure repose sur une couche d'argile dont la résistance au passage de l'eau est plus énergique et détermine par suite une plus grande dénivellation.

Pour le terrain numéro 2, la pente par mètre a été en moyenne de 0^m,015 en janvier, elle est descendue à 0,0007 en juin et a été en moyenne de 0,007. Dans l'argile pure du terrain numéro 1, la pente moyenne par mètre de janvier à juin eût donc été environ de 0^m,009.

Dans les expériences qui nous occupent, l'écoulement des drains s'est arrêté lorsque la charge du plan d'eau au-dessus des drains arrivait à 0^m,12 ; la résistance du terrain agit donc pour maintenir la nappe d'eau souterraine à un certain niveau au-dessus des drains qui l'assainissent, et ce niveau dépend de la composition du sous-sol et surtout de son état hygrométrique.

De ces faits, M. Delacroix tire la conclusion suivante :

« Dans les terrains dont la compacité est faible, ceux, par exemple, composés en partie de silice, et qui doivent uniquement leur humidité permanente à l'existence d'un banc argileux inférieur, la pente du plan d'eau souterrain déterminé par le drainage n'est pas très-sensible. On pourra donc assainir de semblables sols avec un écartement de drains de 40 mètres et plus, même en adoptant les profondeurs de 1 mètre et 1^m,20. Cet écartement pourra même être augmenté si la disposition des lieux permettait d'abaisser les tuyaux d'écoulement. Mais la limite d'écartement se resserrera considérablement en raison de la compacité du sous-sol et de la résistance qu'il oppose à la pénétration de l'eau. C'est dans

ces circonstances que les distances de 10 mètres et moins, pour des profondeurs de 1 mètre à $1^m,20$, doivent être considérées comme nécessaires.

« En posant ces chiffres, nous admettons que l'époque pendant laquelle on cherchera à réaliser l'assainissement complet, c'est-à-dire celui qui empêchera le plan d'eau de se trouver à moins de $0^m,50$ ou $0^m,60$ de distance du sol, sera l'époque de la végétation. On comprend d'ailleurs que, suivant le but qu'on voudra atteindre, suivant la culture que le terrain devra recevoir, et aussi suivant le climat, on pourra, par des considérations analogues, disposer le drainage de manière à conserver plus longtemps la nappe d'eau plus près des racines des plantes, ou à l'en éloigner, au contraire, plus tôt. »

Ces considérations sont très-importantes; elles montrent avec quelle prudence on doit agir pour fixer l'écartement des drains. Les espacements de 10 à 12 mètres ne conviennent qu'aux sols franchement argileux. Si l'on se trouve en présence de sols argilo-sableux, ou de sables reposant sur des couches d'argile, l'assainissement peut s'obtenir avec quelques files de tuyaux espacées de 40 mètres et plus. Dans les terrains de ce genre, ou dans les cas douteux, il convient donc de n'établir qu'une ligne de drains, par exemple tous les 30 ou 40 mètres; si cela est insuffisant, il sera toujours temps de venir intercaler d'autres files de tuyaux entre les premières.

Expériences sur les débits. — A la Motte-Beuvron, M. Delacroix a fait des expériences sur les débits des drains. Il y a deux sorties d'eau, comme nous le verrons, celle du Beuvron et celle du Chicandin. Voici les résultats trouvés à la sortie d'eau du Beuvron :

PÉRIODES D'OBSERVATION.	NOMBRE DE JOURS.	DÉBITS		HAUTEUR DE PLUIE TOMBÉE (MILLIMÈTRES).
		TOTAUX MÈTRES CUBES.	PAR JOUR MÈTRES CUBES.	
D'avril à septembre 1856. . . .	153	13,700	89,5	304
Septembre 1856.	30	2,691	89,7	73
Octobre —	31	1,900	61,3	23
Novembre —	30	973	32,4	36
Décembre —	31	2,164	69,8	57
Janvier 1857.	31	8,125	262,0	58
Février —	28	3,947	111,0	21
Mars —	31	2,299	74,0	29
Avril —	30	2,650	88,3	44
Mai —	31	974	31,4	27
Juin —	30	101	3,4	57
Totaux et moyenne. .	456	39,524	86,6	»

Il est intéressant de considérer les variations des débits quotidiens suivant les mois de l'année. Pendant la première période, d'avril à septembre, le débit est relativement élevé, malgré la saison chaude: c'est qu'il fallait d'abord épuiser toute l'eau emmagasinée dans le terrain à assainir. Mais, dans les mois suivants, le régime régulier s'est établi, et les plus grands débits ne correspondent pas aux plus grandes hauteurs de pluie. Le cube d'eau débité ne provient donc pas tant de l'importance des pluies que de leur succession, et surtout que de l'état hygrométrique de l'atmosphère, et, par suite, du sous-sol. Le débit marche donc en sens contraire de l'évaporation. C'est un fait que nous avons

déjà signalé en montrant que les pluies d'été ne profitaient pour ainsi dire pas aux sources.

Si l'on tient compte des surfaces de terrain assainies et des cubes d'eau pluviale qu'elles ont reçus, on reconnaît que pendant les mois de janvier et février 1857, le débit des drains surpasse la masse d'eau reçue par les terrains qu'ils assainissent. Il y avait donc à cette époque accumulation d'eau dans le sous-sol. En mars et avril, cette réserve semble épuisée : le drainage et l'évaporation agissent simultanément pour l'enlèvement de l'eau fournie par les pluies. En mai et juin, c'est l'évaporation qui agit seule, et son action est des plus puissantes.

3° EXÉCUTION DES TRAVAUX DE DRAINAGE.

L'exécution des travaux de drainage est une opération simple qui demande à être faite par des ouvriers soigneux, avec des outils spéciaux qui la facilitent singulièrement.

Nous avons déjà dit que nous ne nous occuperions pas du nivellement, ni du lever de plan, ni du piquetage sur le terrain, toutes opérations décrites en détails précédemment. Nous décrirons seulement l'opération de l'ouverture des tranchées et de la pose des tuyaux.

Les tranchées sont indiquées sur le terrain par deux lignes de piquets enfoncés à coups de maillet, et dont les têtes sont dans un plan parallèle au fond de la tranchée, de sorte qu'étant donné un piquet, l'ouvrier sait à quelle profondeur il doit creuser à l'emplacement de ce piquet. Il va sans dire que les têtes des piquets ont été convenablement établies par un nivellement simple.

Il importait de réduire le plus possible la section transversale des tranchées afin de diminuer le cube des déblais ; c'est à quoi on est arrivé en adoptant les sections étroites représentées sur la planche IX.

L'ouvrier creuse la tranchée au moyen de bêches, presque toutes de modèle anglais, planche XII. L'ouvrier appuie avec le pied sur la bêche, qui, souvent, est munie d'une pédale : le pied se fatiguerait promptement, si l'ouvrier ne portait soit de forts sabots, soit des souliers garnis d'une forte semelle de fer.

Lorsque la tranchée est arrivée à une certaine profondeur, l'ouvrier descend dedans pour continuer la fouille, et, vu le peu de largeur dont il dispose, il est forcé de s'appuyer du côté gauche, sur la paroi humide de la tranchée. Ce contact prolongé serait dangereux pour la santé, et on ne saurait trop recommander aux propriétaires de donner aux ouvriers des culottes et des brassards en cuir, ainsi que des vêtements de laine et des bottes imperméables.

Les meilleures bêches de drainage sont les bêches anglaises avec poignée transversale ; les ouvriers français préfèrent, par raison d'habitude, la bêche à manche droit, qui est moins commode.

Pour enlever les terres fouillées, on a recours à des pelles inclinées sur le manche, et à des curettes. Dans les terrains argileux, les déblais s'enlèvent facilement avec les bêches courbes ; on a des jeux de bêches courbes dont les largeurs vont en décroissant, de manière à conduire jusqu'au fond de la tranchée.

Souvent les terres gazonnées de la surface s'enlèvent avec une forte fourche à trois dents ; d'autres fois, un ouvrier pioche les couches supérieures, et un autre vient derrière lui pour enlever les terres fouillées.

Lorsqu'on est arrivé au fond de la tranchée, il est bon de lui donner une forme demi-cylindrique ; à cet effet, on bat la terre avec un fouloir en fer ou en bois, planche XII.

L'ouvrier draineur devra toujours être muni d'une hache pour couper les racines.

Généralement, les tranchées s'exécutent par étages, de sorte que les ouvriers se suivent à quelques mètres de distance ; l'atelier est ainsi condensé, et cela n'en vaut que mieux pour la rapidité et la bonne exécution du travail, sur lequel il faut, du reste, exercer une surveillance assidue.

Quand une tranchée est terminée, on en vérifie le profil au moyen d'un gabarit, planche XII, et pour en vérifier la pente, on a recours à des nivelettes.

C'est du reste une bonne précaution de faire traîner au fond de la tranchée un bout de cylindre métallique, qui égalisera le fond et évitera les petites dénivellations brusques ; on sera certain par là de bien placer les tuyaux bout à bout. Il a été construit sur ce principe un appareil très-simple qui a rendu des services, et que M. Mangon a décrit dans son livre sur la pratique du drainage.

Les tranchées étant préparées, il s'agit de poser les tuyaux : on les transporte sur les lieux au moyen de civières *ad hoc*, et on les met en place au moyen d'un posoir en fer ou en bois, planche XII ; ce posoir est muni d'un long manche et porte une broche que l'on fait entrer dans les bouts de tuyaux successifs. C'est avec cette broche qu'on les descend et qu'on les met en place au fond de la tranchée. Lorsqu'on se sert de tuyaux réunis par des manchons, on pose à la fois un tuyau et son manchon, et le posoir porte à cet effet deux rondelles perpendiculaires à la broche ; à l'une s'arrête le tuyau, à l'autre s'arrête le manchon, qui reste en saillie sur le tuyau.

L'emploi des manchons est aujourd'hui peu répandu ; ils ont l'inconvénient de laisser le tuyau en porte à faux sur une partie de sa longueur, et ils ne paraissent pas très-utiles ; mais il faut reconnaître qu'ils facilitent la pose et permettent d'éviter les erreurs dues à la négligence des ouvriers. Lorsqu'on ne se sert pas de manchons, il faut dresser avec le plus grand soin le fond de la tranchée et exercer sur les ouvriers une surveillance assidue : il ne faut pas, dans ce cas, recourir à des ouvriers à la tâche.

Utilité des manchons ou colliers. — « La pose des tuyaux, dit M. Hervé-Mangon, exige beaucoup de soin ; elle doit être confiée à un ouvrier exercé, et constamment surveillée par le directeur du travail.

Quand on emploie des colliers, les tuyaux s'y engagent et sont ainsi maintenus à la suite les uns des autres. On cale les tuyaux et leurs colliers, au fond de la tranchée, au moyen de quelques petites pierres ou de terre émiettée, soigneusement appliquée et un peu pilonnée, sur laquelle on jette ensuite la terre extraite de la tranchée et déposée sur un de ses côtés.

Lorsqu'on n'emploie pas de colliers, on met les tuyaux bout à bout aussi exactement que possible, on les assujettit à leurs points de raccordement au moyen de quelques tessons provenant de tuyaux cassés ou de tuiles, par-dessus lesquels on tasse fortement une motte de terre argileuse aussi grosse que possible, et l'on termine le remplissage comme dans le premier cas. Ce mode de pose est plus délicat que le premier, il demande plus de temps et d'adresse, et il ne peut jamais offrir autant de garanties. Ces désavantages font plus que compenser la très-faible économie qu'il peut présenter sur l'emploi des colliers, dont nous ne pouvons trop souvent recommander l'usage, surtout aux

personnes qui sont obligées de confier leurs travaux à une surveillance étrangère, et qui ne peuvent pas poser elles-mêmes, et un à un, pour ainsi dire, leurs tuyaux de drainage. »

Ainsi que nous l'avons expliqué, le raccordement des gros drains ou collecteurs se fait au moyen de regards en poterie; le raccordement des petits drains et des collecteurs se fait par emboîtement, comme le montre la planche XII. On vend dans les fabriques des tuyaux tout percés; mais si l'on en manque, il est facile d'en percer au moyen du marteau, planche XII; les tuyaux se coupent et se taillent comme on fait pour la brique, et un ouvrier *adroit* arrive vite à faire de bons assemblages.

Lorsqu'une file de tuyaux posée dans les tranchées a été vérifiée, on procède au remplissage; on commence par mettre une bonne couche de terre argileuse que l'on mouille quelquefois et qui forme sur le drain comme un manteau protecteur; l'appel d'eau vers le drain ne se fait pas verticalement, mais horizontalement ou, du moins, suivant une ligne peu inclinée sur l'horizon. La couche argileuse doit être piétinée et battue avec un pilon en bois.

Ce n'est que dans les tranchées très-profondes, où les obstructions ne sont pas à craindre, et où il faut produire un appel énergique, qu'il sera quelquefois utile de recouvrir les drains avec une couche de pierrailles, de manière à donner à l'eau une grande facilité de circulation.

Mais, généralement, il vaut mieux pilonner sur le drain une couche d'argile de $0^m,15$ à $0^m,25$ d'épaisseur.

Le reste du remplissage se fait avec les produits du déblai que l'on pilonne par couches de $0^m,20$. Au cas où il se produirait quelques tassements après l'exécution du travail, il faut avoir soin d'y remédier. La bonne terre végétale doit être réservée pour être mise à la surface.

DES OBSTRUCTIONS.

Les obstructions produites dans les tuyaux, et ayant pour effet de mettre un drainage hors de service, tiennent à trois causes :

Invasion des tuyaux par les racines des arbres ou des plantes avides d'eau;

Incrustation des tuyaux par des dépôts ferrugineux ou calcaires;

Ruptures de tuyaux ou malfaçon dans la pose.

L'invasion des tuyaux par les racines peut être combattue de diverses manières; la meilleure est de recourir, au passage des endroits dangereux, à des drains recouverts et entourés d'une chape de béton, ou bien de recouvrir les joints avec des bourrelets de mortier de ciment. On a proposé de recouvrir les drains avec des fascines : ces fascines étant toujours à sec, les racines ne pourront les traverser; l'efficacité de ce procédé ne paraît pas certaine.

M. Mangon a préservé les drains en tuyaux par des contre-drains en pierres sèches; aux passages dangereux, les tranchées à tuyaux sont flanquées de tranchées à pierres sèches. On espère que les racines, pouvant se développer librement dans celles-ci, n'iront pas envahir les drains.

En ce qui touche l'incrustation des tuyaux par des dépôts calcaires ou ferrugineux, ces dépôts ne se produisent qu'en présence de l'air; l'air permet, en effet, le dégagement de l'excès d'acide carbonique qui maintenait les calcaires

en dissolution; il permet aussi l'oxydation des sels de protoxyde de fer qui se précipitent en masse ocreuse.

Ces dépôts chimiques ne se produisent pas fréquemment : pour en empêcher le développement, il faut interdire à l'air l'accès des tuyaux. C'est à quoi M. Mangon est arrivé en partie en plaçant sur les collecteurs des regards, dans lesquels le tuyau d'amont débouche à quelques centimètres au-dessous du tuyau d'aval. De la sorte, même lorsque l'écoulement s'arrête, il reste sur l'orifice du tuyau d'amont une certaine charge d'eau qui s'oppose à l'introduction de l'air.

Pour ce qui est des obstructions dues aux malfaçons dans la pose et à l'affaissement des tuyaux, nous reproduirons les observations suivantes publiées par M. Vianne dans le journal *le Draineur :*

Si les racines, les calcaires, les dépôts ferrugineux, etc., n'obstruent que rarement et qu'accidentellement, il est d'autres causes de destruction qui sont permanentes et qui perdent beaucoup de drainages. Nous voulons parler de l'emploi de mauvais tuyaux et de malfaçons. Ces cas de destruction ne sont pas accidentels, ils peuvent se produire à chaque opération. Déjà beaucoup de drainages ont été refaits, même en totalité, et cela faute de précaution.

On doit apporter la plus grande attention à la vérification des tuyaux, et ne pas oublier qu'il suffit de l'emploi d'un seul mauvais tuyau pour obstruer un drain, et même annuler l'effet du drainage, si l'obstruction se produit dans le drain collecteur.

On reconnaît le plus souvent la qualité des tuyaux par la simple inspection de la terre après la cuisson; la couleur indique le degré de cuite; mais on n'acquiert cependant cette connaissance que par une certaine pratique. Il est des terres donnant des tuyaux sonores, et qui néanmoins se délitent par un séjour plus ou moins long dans l'eau; d'autres ne sonnent pas clairement, et donnent cependant de bons tuyaux qui résistent à l'action prolongée de l'humidité.

Un moyen facile de s'assurer de leur qualité, c'est d'en faire tremper pendant quelques jours dans l'eau. Si au bout de quatre à cinq jours de séjour dans l'eau ils ne sont pas ramollis et conservent le même son que ceux qui n'ont pas été trempés, on peut les employer sans aucune crainte.

Il y a quelques mois, nous avons été appelé dans le département du Loiret pour refaire un drainage qui était exécuté depuis un an, et qui ne fonctionnait plus. Les tuyaux provenaient d'une fabrique d'Orléans; pas un seul n'avait résisté. Ils étaient fabriqués avec une terre très-siliceuse et manquaient de cuisson. Tous les tuyaux relevés s'écrasaient sous la pression des doigts. Ce fait n'est malheureusement pas isolé, et beaucoup de drainages se trouvent dans le même cas.

D'autres tuyaux contiennent du calcaire en grande quantité. Ces amas calcaires se transforment en chaux à la cuisson, et l'humidité, faisant foisonner la chaux, fait éclater le tuyau. Nous avons connaissance d'un drainage entièrement perdu pour cette cause dans le canton de Limours (Seine-et-Oise).

Il est donc essentiel de n'employer que des tuyaux bien cuits, et de rejeter tous ceux qui laisseraient le moindre doute.

Parce que la théorie du drainage est excessivement simple, il ne suit pas de là qu'il en soit de même de la mise en pratique. Il est vrai qu'au premier abord rien ne paraît plus facile que d'ouvrir une tranchée, d'y placer un tuyau et de la combler ensuite. Certes, si l'on opérait toujours dans des terrains ayant une pente uniforme, suffisamment humides pour présenter un travail facile, renfer-

mant assez d'eau pour guider le règlement du fond, ayant assez de consistance pour ne pas s'ébouler avant l'ouverture et la mise à fond de toute la longueur du drain, et permettant, par conséquent, de commencer la pose des tuyaux par la partie supérieure, l'opération serait très-simple, et il suffirait de prêter une grande attention à la pose des tuyaux, au remplissage et aux croisements, pour être assuré d'un bon travail; or non-seulement toutes ces conditions ne se trouvent pas toujours réunies, mais il arrive le plus souvent que, lorsqu'on les rencontre, les propriétaires ou fermiers laissent toute latitude aux ouvriers et se dispensent d'un surveillant, qu'ils considèrent comme une dépense inutile et superflue. Cependant ceux qui ont usé des deux moyens sont bien vite convaincus qu'une bonne exécution est impossible sans un surveillant, car on ne peut jamais obtenir des ouvriers assez de soin, surtout pour la pose des tuyaux. Ils n'ont en vue que l'avancement du travail; peu leur importe qu'il soit durable.

Selon nous, il est donc impossible de drainer sans une surveillance active et permanente; c'est une des premières conditions du succès.

Mais, lorsqu'on opère dans des terrains qui ont une faible pente, ou qui ne présentent pas de consistance, l'opération devient plus difficile, et souvent les conducteurs les plus habiles et les plus patients se trouvent embarrassés.

DRAINAGE D'UNE PIÈCE DE DEUX HECTARES (ARGILES DU GATINAIS).

La figure 1 de la planche XII donne le plan du drainage d'une pièce de 2 hectares, dont une partie est plantée en vigne, et le reste est en labour.

Cette pièce, située sur un côteau exposée au levant, se trouve dans le Gâtinais, arrondissement de Montargis. Elle appartient donc à une formation argileuse, et en effet la couche arable de $0^m,25$ d'épaisseur repose sur un sous-sol argileux compacte mélangé de quelques parties de marne.

L'espacement uniforme des drains est de 12 mètres, et leur profondeur au-dessous du sol varie de $1^m,10$ à $1^m,30$.

La direction des drains est commandée dans la partie en vigne par la direction des rangs de ceps; les files de drains sont parallèles à ces rangs; aussi, comme ils rencontraient le collecteur principal sous un angle légèrement obtus du côté de l'amont, ce qui s'oppose à l'écoulement, on a eu soin de les infléchir avant leur arrivée au collecteur, de telle façon que l'angle des drains et de la partie amont du collecteur fût un angle aigu.

Dans la partie en labour, cette sujétion n'existait plus; les files de drains sont établies de manière à rencontrer le collecteur sous un angle aigu, sans qu'il soit besoin de raccord. Ces lignes ne sont pas absolument dirigées suivant la plus grande pente du terrain, mais cela n'était pas indispensable à cause de la grande inclinaison du versant.

Un regard est établi au point de croisement du collecteur secondaire et du collecteur principal.

La bouche, qui termine le collecteur principal à l'aval, s'ouvre dans un fossé, à $0^m,30$ au-dessus du fond. Immédiatement à l'aval se trouve un ponceau dont il a fallu abaisser le radier.

Les pentes des files de drains sont comprises entre 48 et 13 millimètres par mètre.

Le collecteur principal a une pente de 0m,005 à l'aval du regard et de 0m,011 à l'amont.

Voici le détail des dépenses :

	Francs.
1304 mètres de drains ordinaires de 0m,035 de diamètre à 0f,08 ou bien 4347 tuyaux à 24 fr. le mille.	104,32
140 mètres de collecteur de 0m,07 de diamètre à 0f,25 le mètre.. .	35,00
40 — 0m,05 — 0f,20 le mètre.. .	22,00
Frais de transport.	10,00
Fouille, pose des drains et collecteurs, remplissage des tranchées 1554 mètres à 0f,20..	310,80
	482,12
Dépenses diverses, abaissement du radier du ponceau.	67,88
Total.	550,00

Prix de revient par hectare : 275 francs en 1860.

DRAINAGE D'UNE PIÈCE DE 7 HECTARES 62 (ARGILES DU GATINAIS).

La figure 1, planche XIII, donne le plan d'un drainage effectué sur une étendue de 7 hectares 62 ares. La pièce dont il s'agit se trouve sur le territoire de Beaune-la-Rolande (Loiret), et appartient aux argiles du Gâtinais.

Comme le montrent les profils de sondage, la terre végétale n'a qu'une épaisseur de 0m,15; elle repose sur une argile compacte. L'imperméabilité de cette formation se manifeste par les flaques d'eau qui recouvrent les bas-fonds longtemps après la pluie, même en été; la végétation y est très-tardive, et l'excès d'humidité y est accusé par la présence de joncs et de colchiques qu'on y trouve en abondance.

Les versants sont surtout plantés en vignes; ils peuvent être facilement drainés en plaçant les files de tuyaux parallèlement aux lignes de ceps, d'autant plus que ces lignes coïncident sensiblement avec les lignes de plus grande pente.

Les drains de 0m,035 de diamètre sont placés par files espacées de 12 mètres; leur pente n'est pas inférieure à 1 millimètre par mètre. Elle est plus grande, à mesure qu'on s'élève sur les versants.

On voulait à l'origine conserver pour collecteur un fossé qui existait dans le thalweg, à peu près à l'emplacement du collecteur principal; mais les ingénieurs des ponts et chaussées, qui rédigeaient le projet, firent remarquer aux propriétaires qu'il était fort dificile d'assurer et de maintenir le débouché des collecteurs dans un fossé qui exigerait un entretien continuel, et la suppression du fossé fut décidée.

Le diamètre du collecteur est de 0m,08 de A en B, et de 0m,10 dans la partie aval jusqu'à la rencontre du ponceau qui livre passage à la route départementale n° 11.

Des regards sont ménagés sur le collecteur principal en A, B et C; à l'aval de B, on n'a pas jugé utile de prévoir des regards, parce que le diamètre du collecteur principal est plus grand, et que les collecteurs secondaires qu'il reçoit sont beaucoup moins importants.

La dépense s'est élevée à environ 250 francs l'hectare.

Le collecteur principal se déverse, avons-nous dit, dans un aqueduc qui passe sous la route départementale; à cet aqueduc fait suite un petit cours d'eau, affluent du Fusin.

On voit par cet exemple que pour dresser un projet de drainage il suffit d'avoir un plan parcellaire bien établi, sur lequel on a tracé avec soin des courbes de niveau équidistantes. Le métré des travaux est facile à faire, puisque tout s'évalue au mètre courant, et qu'il suffit de mesurer les longueurs à l'échelle du plan.

Le drainage que nous venons de décrire présente cet intérêt particulier qu'il a été exécuté par les propriétaires intéressés, réunis en association syndicale libre. C'est un exemple bon, mais difficile à suivre.

DRAINAGES EFFECTUÉS DANS LE DÉPARTEMENT DE SEINE-ET-MARNE.

Le département de Seine-et-Marne, où l'agriculture est très-développée, et qui présente une grande surface de terrains imperméables, s'est lancé un des premiers dans la voie du drainage. Dès 1842 on y a tenté des essais importants, et voici, d'après M. Marx, inspecteur général des ponts et chaussées, les travaux effectués, et les résultats obtenus au 1[er] janvier 1867 :

Travaux effectués. — A cette date, la superficie drainée était de 19,445 hectares; sur cette quantité 3328 hectares ont été drainés d'après les projets et sous la surveillance des agents de l'administration des ponts et chaussées.

Le concours du Crédit foncier a été utilisé pour 2547 hectares, et le chiffre des avances faites s'est élevé à 564,500 francs.

Dispositions adoptées. — Les dispositions varient suivant la nature et la forme des terrains. En donnant les limites extrêmes, nous indiquerons entre quels termes l'opération peut être faite :

	Mètres.
Espacement des drains..................	10 à 21
Profondeur des tranchées.................	1 à 1,30
Diamètre des tuyaux..................	0,03 à 0,15
	Francs.
Prix des tuyaux, le mille................	22 à 300
Prix de l'hectare drainé, y compris frais d'études et de surveillance..................	235 à 330

Résultats obtenus. — Un grand nombre d'observations suivies pendant un grand nombre d'années pouvaient seules permettre de s'approcher de la vérité. C'est ce qui a été tenté dans Seine-et-Marne. Un compte a été ouvert à toutes les superficies de quelque importance soumises au drainage. On a enregistré la production moyenne avant et après l'opération.

Pour les céréales, le rendement à l'hectare		s'est élevé de	18 hect.	à 24
— avoines	—	—	25	— 23
— colzas	—	—	17	— 23
— prairies artificielles		—	35 quint.	à 47

« Il résulterait de ces chiffres, dit M. Marx, une plus-value de 30 à 35 0/0. Il ne faut pas l'attribuer uniquement au drainage. Il est certain qu'à la suite d'un travail de cette nature on soigne davantage la culture, on met plus d'engrais, on renouvelle le marnage.

Néanmoins, cette proportion peut être considérée comme s'approchant beaucoup de la vérité, parce que les chiffres du rendement ne peuvent pas tenir compte d'une facilité considérable donnée à la culture. C'est la possibilité de façonner le terrain, très-peu de temps après la pluie, souvent huit jours avant un sol de même nature non drainé. C'est là un avantage considérable pour les labours d'octobre où, même avec des alternatives de beau temps, le cultivateur ne peut pas toujours arriver à trouver un moment favorable.

Les avantages du drainage sont aujourd'hui tellement bien compris, par les fermiers du département de Seine-et-Marne, qu'ils offrent aux propriétaires 6 et même 6 1/2 0/0 du capital employé. Un fermier de l'arrondissement de Coulommiers, possédant un bail de vingt ans, a fait drainer à ses frais plus de 100 hectares dans la ferme qu'il exploite, et l'on ne doute pas qu'il y trouve un très-large bénéfice. »

DRAINAGES EXÉCUTÉS DANS LE DÉPARTEMENT DU JURA.

Les drainages exécutés dans le Jura, et dont M. l'ingénieur Lamairesse a rendu compte, se présentent dans les conditions les plus variées. Ils s'appliquent aux marnes et argiles de presque tous les étages géologiques, aux tourbières complétement noyées et aux argiles compactes que l'eau ne pénètre pas, aux éboulis schisteux inclinés à 45° et aux assises calcaires presque horizontales. Voici les principes suivis :

1° Par raison d'économie, comme dans l'intérêt de l'assainissement, donner au drainage la profondeur de la couche humide et molle jusqu'à concurrence de $1^{m},70$; ainsi, dans les marais tourbeux, descendre le plus bas possible, et adopter de larges espacements, afin d'intercepter les nappes d'eau les plus basses et les plus puissantes, sans dessécher outre mesure les marais, faute que M. de Prony recommande d'éviter. Dans les terrains secs et durs, tels que les poudingues, avoir le moins de profondeur possible, $0^{m},60$ au minimum pour les champs et prés, et $1^{m},10$ pour les vignes, parce que la dépense augmente rapidement avec la profondeur, sans qu'il en soit de même des effets utiles du drainage; il suffit alors d'assainir et d'aérer la couche supérieure du sol.

2° Adopter pour espacement 12 à 13 fois la profondeur dans les prés, 10 à 12 dans les champs, et 9 dans les vignes et jardins.

3° Dans les terrains accidentés, ne fixer la direction des drains qu'après avoir déterminé le sens probable de l'écoulement des eaux souterraines, eu égard à la conformation du bassin. Creuser le drain de ceinture d'amont aussi profondément que possible; ne pas craindre de croiser avec les drains la ligne de plus grande pente, si la forme de la propriété le commande.

4° Dans tous les terrains, et principalement dans ceux faisant suite à de fortes pentes, avoir des drains de ceinture en communication avec tous les autres; l'air circule alors largement depuis les cheminées d'appel placées aux points hauts jusqu'aux regards et aux bouches de sortie. Adopter d'abord un espace-

ment de 16 mètres, afin de doubler facilement les files de drains si le terrain est rétentif; ne pas dépasser 16 mètres, afin de maintenir toujours une bonne aération.

5° Se débarrasser des sources et des eaux ambiantes par des écoulements superficiels indépendants du drainage. Dans l'année qui suit l'exécution du drainage, l'entretenir avec le plus grand soin, et combler les affaissements à l'emplacement des tranchées, afin d'empêcher les ravinements.

Par ces moyens on est arrivé aux résultats suivants :

La surface du sol a été desséchée et raffermie aussitôt après le drainage, et les eaux de pluie ont cessé de séjourner;

L'effet a été beaucoup plus sensible lorsque les tranchées ont pu rester ouvertes pendant quelques mois, lorsque, par exemple, on les a ouvertes après la moisson et qu'on leur a laissé passer l'automne, l'hiver et le commencement du printemps sans les remplir;

Lorsqu'on a drainé des marais où aboutissent des versants étendus et rapides, le produit des sources a augmenté plutôt que diminué, à la suite de l'exécution des travaux, et il a fallu se ménager des débouchés exceptionnels; les drainages de certains marais peu étendus donnent un débit capable de faire mouvoir des usines;

Il paraît acquis par l'expérience que l'on n'a pas à craindre l'obstruction des tuyaux par les racines de la vigne; elles semblent fuir les tuyaux à cause de l'humidité qui s'y trouve; le contraire a lieu avec les racines des arbres à bois blanc.

Voici quelques exemples de drainage :

1° Terre et pré de 7 hectares, sous-sol d'argile bleuâtre et blanchâtre, homogène, compacte, assez molle et humide, dénuée de chaux, pentes plus que suffisantes; profondeur $1^m,20$; espacement 15 mètres; dépense par hectare 250 à 300 francs. Pour arriver à dessécher toute la surface uniformément entre les drains, il a fallu 4 ans; les mauvaises herbes des prés avaient alors disparu; les terres drainées ont moins souffert de la sécheresse que les champs voisins non drainés. Les produits ont doublé en quantité et en qualité.

2° Ancien étang, extrêmement froid et humide, dans l'argile de Bresse, mou à une profondeur indéfinie. Profondeur $1^m,50$, espacement 17 mètres. Ce drainage n'a coûté que 130 francs, à raison de l'avantage des longs outils dans les terrains mous et tourbeux. Pendant la sécheresse de 1857, le maïs ne souffrait pas encore de la sécheresse, alors que les maïs voisins dépérissaient depuis quinze jours.

3° Pré de $1^h,84$ à Champagnole. Profondeur $1^m,40$ à $1^m,50$; espacement 16 à 18 mètres. Pré marécageux au pied de versants extrêmement rapides et étendus. Sous la terre végétale, couche de $0^m,30$ à $0^m,60$ d'argile pure, au-dessous argile mélangée de pierres avec filets d'eau. Ce drainage a été un essai pour procurer de l'eau à la commune de Champagnole. On a, dans les fortes sécheresses, 8 litres à la minute.

4° 2 hectares pré tourbeux. Profondeur $1^m,50$, espacement 17 mètres. Ancien étang, souvent inondé par un cours d'eau le traversant; tourbeux, humide et mou à une profondeur indéfinie, renfermait beaucoup de bois carbonisés. On a rectifié et approfondi le ruisseau, et, au moyen de drains de ceinture, on a isolé le pré des coteaux argileux environnants. A cause de l'avantage des longs outils dans les terrains tourbeux, la dépense s'est élevée à 100 francs seulement par hectare.

5° Pré de 6 hectares à Lavigny. Profondeur $1^m,10$ à $1^m,70$, espacement 16 à 22 mètres. Ancien étang au pied de versants escarpés, plantés de vignes et assainis aussi. On trouvait d'abord $0^m,40$ de terre végétale, puis $0^m,70$ d'argile marneuse, compacte ou tourbeuse, puis une profondeur variable de 1^m à 1^m70 de béton de gravier et argile, sur lequel reposait la couche aquifère. Jusqu'à ce qu'on ait atteint ce béton, on n'a trouvé que des suintements; mais, lorsqu'on l'a entamé, il a coulé une énorme quantité d'eau surtout dans les drains de ceinture. Quelques drains, tenus au-dessus du béton, n'ont produit qu'un effet incomplet et ont dû être recreusés. Le ruisseau du thalweg a été approfondi à $1^m,50$ pour recevoir les bouches de décharge. Il forme maintenant l'origine d'un ruisseau qui, à cent mètres de là, fait tourner deux roues d'un moulin avec les eaux du drainage.

6° 2 hectares de pré. Profondeur $1^m,20$, espacement 15 mètres. Marais inabordable sur un plateau élevé appartenant au diluvium. On trouvait sous la terre végétale $0^m,40$ à 1 mètre de gravier sablonneux, puis une glaise imperméable et dure, dont la déclivité, du reste très-faible comme celle du champ, était en sens contraire de cette dernière. La décharge alimente en tout temps la roue d'une usine. L'effet du drainage s'est étendu sur les champs voisins à une grande distance; c'est là ce qui explique l'abondance du débit.

DRAINAGE DES BOURGS DE LA MOTTE-BEUVRON ET DE LA FERTÉ-SAINT-AUBIN

(SOLOGNE)

Le drainage des bourgs de la Motte-Beuvron et de la Ferté-Saint-Aubin, situés tous deux dans les terrains argilo-sableux de la Sologne, a été exécuté par M. l'ingénieur Delacroix, qui a rendu compte de son travail dans les Annales des ponts et chaussées de 1860.

1° **Bourg de la Motte-Beuvron.** — Le bourg de la Motte-Beuvron (planche 11) a deux rues principales : l'une est la route Nationale, n° 20, et l'autre la rue de l'Église, qui n'a de maisons que d'un côté. La route Nationale est dirigée à peu près du nord au sud ; au nord coule la petite rivière du Chicandin et au sud le Beuvron. C'est à ces deux cours d'eau qu'aboutissent les lignes de drains placées à 2 ou 3 mètres au-devant des maisons dans le sol de la voie publique : ces lignes représentent des collecteurs principaux où aboutissent les drains des propriétés particulières. Pour faciliter les raccords, on a placé sur les collecteurs des regards en poterie qui se rencontrent en face de toutes les portes cochères et de tous les points où on pensait qu'on pourrait dans l'avenir faire aboutir de petits drains.

Ces regards permettent du reste de visiter et de réparer facilement le drainage; les eaux s'y décantent et y déposent les vases qu'on enlève de temps en temps.

De $0^m,30$ à $0^m,40$ de diamètre, ces regards (fig. 2), formés de manchons à emboîtements assemblés avec du ciment romain, sont descendus à $0^m,50$ au-dessous des lignes de drains. Ils sont fermés haut et bas par un plateau en bois.

Dans chacun d'eux il y a une chute de 4 à 5 centimètres.

Les drains ont été placés à $1^m,80$ de profondeur; on voulait assainir le sol assez profondément pour permettre d'établir partout des caves de $1^m,65$ de hauteur.

Les profils en long, figures 3, 4, 5, donnent les pentes moyennes des drains vers le Chicandin et vers le Beuvron; l'écoulement est plus facile de ce dernier côté; aussi a-t-il suffi d'employer vers le Beuvron trois tuyaux de $0^m,075$ de diamètre intérieur, tandis qu'il en a fallu quatre de l'autre côté.

Le développement des tuyaux posés correspond à une longueur de $3677^m,53$, et le chiffre de la dépense se décompose comme il suit ;

	Francs.
Ouverture des drains et pose.	1606,19
Fouille, pose et fourniture de 38 regards. . . .	560,17
Accessoires, repères des regards,.	499,50
Tuyaux.	727,48
Total.	3393,34

L'exécution des travaux s'est fait par application de la loi de 1807, et notamment des articles 35 à 37 :

« Art. 35. Tous les travaux de salubrité qui intéressent les villes et les communes seront ordonnés par le gouvernement, et les dépenses supportées par les communes intéressées.

Art. 36. Tout ce qui est relatif aux travaux de salubrité sera réglé par l'administration publique. Elle aura égard, lors de la rédaction des rôles de la contribution spéciale destinée à faire face aux dépenses de ce genre de travaux, aux avantages immédiats qu'acquerraient telles ou telles propriétés privées pour les faire contribuer à la décharge de la commune dans des proportions variées et justifiées par les circonstances.

Art. 37. L'exécution des deux articles précédents restera dans les attributions des préfets ou conseils de préfecture. »

D'après ces principes, le maire a fait exécuter les travaux sous la surveillance des ingénieurs; il a été demandé aux intéressés une cotisation de 0 fr. 70 par mètre courant de façade. Une subvention de l'État combla le déficit.

Résultats obtenus. — Le sol argilo-sableux de la Sologne repose sur un sous-sol imperméable; les eaux séjournent donc sur ce terrain, et il s'établit un plan d'eau plus ou moins rapproché du sol suivant la puissance de l'évaporation.

La présence de ce plan d'eau engendre des brouillards humides et chargés des ferments et des miasmes de la terre; le sol, sans cesse refroidi, est impropre à la végétation. Aussi le pays est-il insalubre et infécond, ravagé par les fièvres et impropre à la culture des céréales.

Le drainage par tuyaux, ayant pour effet d'abaisser considérablement le plan d'eau, fait disparaître les inconvénients de la nature du sol.

C'est surtout dans les agglomérations d'habitants qu'il faut les combattre.

« Il suffit, pour être frappé de cette pensée, dit M. Delacroix, de parcourir quelques bourgs de la Sologne et de pénétrer un moment dans leurs maisons. On y sentira dans presque toutes, à l'entrée, une impression de froid pénible, impression beaucoup plus sensible dans les maisons des ouvriers peu aisés, qui sont établies le plus souvent en contre-bas du niveau du sol. Ces derniers ont, pendant les temps humides, l'eau en permanence sur le plancher des chambres

d'habitation, . s'explique en ce que le niveau du plan souterrain est alors à fleur de so t rare dans ces pays de pouvoir fonder les constructions autrement qu 'eau, et l'on comprend ainsi pourquoi il n'existe pas de caves dans c ıns. Les caveaux qui les remplacent, et qui sont à 0m,60 ou 0m,70 au- des terrains environnants, sont encore pendant les saisons pluvieuse nment remplis d'eau. Il est difficile aussi de trouver des cimetières d els les sépultures puissent se faire convenablement en toute saison. s y sont presque toujours ensevelis dans l'eau, et à certaines époque ı détrempé s'éboule tellement, qu'il est impossible d'atteindre la prof ılue. Il résulte de là pendant les chaleurs des émanations repouss ›ut lorsque les cimetières sont placés au milieu des habitations, ainsi rive assez souvent.

T étant la conséquence d'une même cause, l'imperméabilité du terr ıaturel de chercher à y remédier par le drainage. »

J ırainage a parfaitement réussi ; le plan d'eau s'est abaissé de 1m ıns les puits dont l'eau s'est améliorée. — Plus de 60,000 mètres c t été enlevés en treize mois, et les bouches de sortie alimentent ù les habitants viennent puiser. Les caveaux restent maintenant

heureux ont si bien frappé les populations, qu'aucune difficulté e lors du recouvrement des cotisations.

a Ferté-Saint-Aubin. — Le bourg de la Ferté-Saint-Aubin est traroute Nationale, n° 20, sur laquelle s'embranchent à droite et à rues principales. Voir le plan, figure 6 planche XI. — C'est la qui sert d'artère principale aux écoulements des rues transversales 'uit le produit jusqu'à la rivière du Cosson, rivière coulant de l nord de la ville.

›ur le drain de sortie une pente suffisante, il a fallu lui faire ıtionale et le diriger suivant la droite HI pour le faire dé- ı barrage de retenue établi sur le Cosson ; par ce moyen, on e drain à 1m,25 en contre-bas du sol dans les parties les plus d deux débouchés pour les drains : toutes les eaux de la parti ıt en C et suivent le chemin CE pour tomber sous le pont d les eaux des parties basses suivent la voie précédemment dé.

ısqu'au point C existent deux files de drains à 3m,50 en av... partir de ce point, les deux collecteurs, celui des parties hautes et celui des parties basses, sont superposés dans la même tranchée, et le plus élevé a été posé sur un gradin ménagé dans le talus de la tranchée.

Dans les rues transversales existe une seule ligne de drains placée suivant l'axe.

On a adopté deux systèmes de regards.

Le premier est en poteries avec plateaux en bois; il a 0m,22 de diamètre, et il y a lieu d'exécuter une fouille toutes les fois qu'on veut le visiter, figure 7.

Le second, de 0m,40 de diamètre, est en poterie à la partie inférieure et en briques à la partie haute, figure 8 ; la margelle en pierres de taille est munie d'une rainure pour recevoir une plaque en fonte.

Il y a 5 grands regards et 31 petits. Des chutes y ont été ménagées comme à la Motte-Beuvron.

Les drains des parties hautes ont $0^m,045$ de diamètre, ceux des parties moyennes $0^m,065$, et ceux des parties basses à pente faible $0^m,10$ et $0^m,16$.

La dépense s'est élevée à 3,200 fr. pour $1718^m,40$ de longueur de lignes, soit 1 fr. 86 par mètre courant. Les grands regards ont coûté 80 fr. la pièce et les petits 10 fr.

Le drain d'écoulement des eaux du drainage inférieur a été obstrué à son passage dans la prairie par des racines de peupliers; on vit l'eau remonter dans les regards et l'écoulement s'arrêter. Les racines avaient pénétré par les joints et s'étaient développées dans les tuyaux sous forme de faisceaux de chanvre comprimé; certaines obstructions étaient en tampons, d'autres s'étendaient sur 3 ou 4 mètres de longueur.

L'introduction des racines s'était faite à plus de 20 mètres des arbres. Il a fallu relever les drains et les remplacer par un tuyau continu en ciment.

Au point de vue de l'assainissement et de l'abaissement du plan d'eau dans les caves, les mêmes résultats ont été obtenus à la Ferté-Saint-Aubin qu'à la Motte-Beuvron.

DRAINAGE VERTICAL.

Lorsqu'un terrain imperméable est superposé à des assises perméables et caverneuses, et qu'on éprouve des difficultés pour se débarrasser des eaux de drainage, on peut recourir à ce qu'on appelle un drainage vertical, c'est-à-dire donner aux eaux un écoulement souterrain. Il suffit pour cela d'amener les collecteurs dans des puits ou puisards foncés jusqu'à la couche perméable. Les eaux seront absorbées par cette couche et iront alimenter les nappes souterraines.

Ce procédé ne réussit pas toujours, et il faut être bien sûr des propriétés absorbantes du sous-sol pour se décider à l'appliquer. Souvent, on a construit des puisards ou boit-tout, sur lesquels on fondait de grandes espérances et qui n'ont donné que de médiocres résultats. Il faut sur ce point consulter l'expérience.

En France, dit M. l'ingénieur de Villeneuve, le morcellement de la propriété, douze fois plus grand que celui des domaines anglais, donne un mérite sérieux et un à-propos spécial aux évacuations par puits absorbants; on est par là dispensé de la nécessité de prolonger les canaux d'évacuation jusque dans les propriétés appartenant à des tiers.

Les explorations géologiques qui éclairent la recherche des évacuants souterrains à l'aide des failles, des cavernes et des couches perméables sous-jacentes, sont donc, en France plus qu'ailleurs, d'utiles auxiliaires des procédés de drainage.

Que l'on songe que les assainissements des vallées de Cuges, d'Aubagne et Gemenas, dans les Bouches-du-Rhône, sont fondés sur la mise à profit des puits absorbants fonctionnant encore bien depuis six siècles, et l'on concevra tout ce que la recherche des absorbants souterrains offre de ressources au drainage français.

« L'heureuse influence de l'assaisissement des terrains imperméables est, dit M. Belgrand, très-remarquable en Brie. Les amas de meulière y exercent naturellement une certaine action de drainage ; depuis longtemps, on a aug-

menté cette puissance de la meulière, en la mettant en communication avec la surface du sol au moyen des mares, anciens trous d'extraction de meulière et de marne. Ces excavations sont desséminées à profusion sur toute la surface des grands plateaux de la Brie, et les cultivateurs y dirigent les eaux pluviales qui, sans cela, convertiraient leurs terres en gâtines. Des ruisseaux très-profonds et et à très-faible pente, creusés jusqu'à la meulière, sillonnent aussi la contrée dans tous les sens. »

C'est là un exemple de drainage vertical, moitié naturel, moitié artificiel.

Nous en citerons un autre exemple complétement artificiel pris dans le Loiret à la ferme du Plessis.

Pour se débarrasser des eaux des collecteurs, il fallait les jeter dans un thalweg coupé par de petits étangs dont le niveau est très-élevé.

De la sorte il était difficile d'assurer l'écoulement, tandis qu'avec un puits vertical on réussit parfaitement.

Ce puits est ouvert sur 4^{m},75 de hauteur dans des terrains argileux (argiles du Gâtinais) et sur 7^{m},75 dans les calcaires lacustres de Beauce, formation éminemment perméable. A cette profondeur totale de 12^{m},50, le puits pénètre dans une nappe d'eau dont le niveau s'est élevé dans le puits de 0^{m},50 au-dessus du fond.

Avant l'achèvement des travaux, les eaux très-abondantes reçues par le terrain à drainer sont entrées par l'orifice du puits et l'ont rempli en entier. Mais, au bout de peu de temps, elles disparurent complétement. Maintenant, le puits est fermé; les eaux n'y arrivent que par les collecteurs dont le jeu est régulier. L'écoulement se fait bien et tout donne le droit de penser que les bons effets du drainage se maintiendront.

On aura donc chance de succès toutes les fois que les puisards seront établis dans des terrains aussi perméables que le calcaire de Beauce.

LÉGISLATION DU DRAINAGE.

Les anciens législateurs ne s'étaient pas occupés de l'opération du drainage, qui du reste est toute moderne.

La loi du 10 juin 1854 a eu pour objet de faciliter le développement de cette importante amélioration agricole. En voici le texte :

Loi sur le libre écoulement des eaux provenant du drainage (10 *juin* 1854).

Article 1er.

Tout propriétaire qui veut assainir son fonds par le drainage ou un autre mode d'assèchement, peut, moyennant une juste et préalable indemnité, en conduire les eaux souterrainement, à ciel ouvert, à travers les propriétés qui séparent ce fonds d'un cours d'eau ou de toute autre voie d'écoulement.

Sont exceptés de cette servitude, les maisons, cours, jardins, parcs et enclos attenant aux habitations.

Art. 2.

Les propriétaires de fonds voisins ou traversés ont la faculté de se servir des travaux faits en vertu de l'article précédent, pour l'écoulement des eaux de leurs fonds.

Ils supportent dans ce cas,: 1° une part proportionnelle dans la valeur des travaux dont ils profitent ; 2° les dépenses résultant des modifications que l'exercice de cette faculté peut rendre nécessaires ; et 3° pour l'avenir, une part contributive dans l'entretien des travaux devenus communs.

ART. 3.

Les associations de propriétaires qui veulent, au moyen de travaux d'ensemble, assainir leurs héritages par le drainage ou tout autre mode d'asséchement, jouissent des droits et supportent les obligations qui résultent des articles précédents. Ces associations peuvent, sur leur demande, être constituées, par arrêtés préfectoraux, en syndicats auxquels sont applicables les articles 3 et 4 de la loi de 14 floréal an XI.

ART. 4.

Les travaux que voudraient exécuter les associations syndicales, les communes ou les départements, pour faciliter le drainage ou tout autre mode d'asséchement, peuvent être déclarés d'utilité publique par décret rendu en Conseil d'État. Le règlement des indemnités dues pour expropriation est fait conformément aux paragraphes 2 et suivants de l'article 16 de la loi du 21 mai 1836.

ART. 5.

Les contestations auxquelles peuvent donner lieu l'établissement et l'exercice de la servitude, la fixation du parcours des eaux, l'exécution des travaux de drainage ou d'asséchement, les indemnités et les frais d'entretien, sont portés en premier ressort devant le juge de paix du canton, qui, en prononçant, doit concilier les intérêts de l'opération avec le respect dû à la propriété.

S'il y a lieu à expertise, il ne pourra être nommé qu'un seul expert.

ART. 6.

La destruction totale ou partielle des conduits d'eau ou fossés évacuateurs est punie des peines portées à l'article 456 du Code pénal.

Tout obstacle apporté volontairement au libre écoulement des eaux est puni des peines portées par l'article 457 du même Code.

L'article 463 du Code pénal peut être appliqué.

Il n'est aucunement dérogé aux lois qui règlent la police des eaux.

DEUXIÈME SECTION

EAUX UTILES

CHAPITRE PREMIER

IRRIGATIONS

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

Historique. — L'importance agricole des arrosages ou irrigations est reconnue depuis une haute antiquité.

Les pays de l'extrême Orient, la Chine, le Japon et la Perse, doivent leur grande fertilité à leurs irrigations dont l'histoire a été faite par M. Jaubert de Passa.

L'histoire nous apprend comment l'Égypte est fécondée chaque année par les eaux du Nil, qui se répandent sur d'immenses surfaces.

On trouve dans l'Italie des vestiges d'anciens aqueducs d'irrigation. Les canaux d'irrigation de l'Espagne remontent aux premiers siècles de notre ère et ont été perfectionnés par les Maures qui ont fait preuve d'une grande habileté dans l'établissement des travaux de ce genre.

Dans les pays méridionaux dont nous venons de parler, c'est seulement avec le concours des irrigations que l'on peut assurer le succès des cultures d'été. Il n'est donc pas étonnant que l'agriculture se soit ingéniée, dès les premiers âges, à trouver les moyens de se procurer de l'eau.

Dans nos climats septentrionaux, dans le nord de la France, par exemple, l'humidité naturelle du sol est suffisante pour la plupart des cultures. Le besoin des arrosages ne s'est fait sentir qu'avec les progrès agricoles réalisés dans les temps modernes.

Dans le Midi, l'irrigation est une nécessité, dans le Nord, elle n'est qu'un perfectionnement.

Action des eaux d'irrigation. — On peut considérer l'action des eaux d'irrigation sous trois aspects différents :

1° Ces eaux fournissent au sol l'humidité nécessaire à toute végétation.

2° Elles lui abandonnent de plus, en partie ou en totalité, les substances mi-

nérales qu'elles tiennent en dissolution ; et à ce titre, les eaux d'irrigation jouent le rôle d'amendement ou d'engrais, tandis que, si elles étaient chimiquement pures, elles ne feraient que donner au sol l'humidité qui lui manque ;

3° Enfin, les eaux d'irrigation agissent par les matières solides qu'elles tiennent en suspension et qu'elles déposent sur le sol lorsque leur vitesse se ralentit Ces dépôts transforment en terre fertile le sol le plus aride ; ce sont eux qui font la richesse de nos grandes vallées. Lorsque les eaux agissent par des dépôts de ce genre, elles déterminent ce qu'on appelle un colmatage ; nous étudierons les colmatages au chapitre suivant, et nous considérerons dans celui-ci les irrigations proprement dites.

1° **Action de l'humidité.** — Tout le monde sait qu'une certaine proportion d'humidité est indispensable à la végétation. Une terre pulvérisée et mélangée des engrais les plus riches ne produira rien si on ne lui ajoute une certaine quantité d'eau.

L'eau est le véhicule par lequel les substances organiques et minérales passent du sol dans les végétaux ; ce sont les radicelles qui les absorbent.

La végétation entraîne une énorme consommation d'eau, et cette consommation est d'autant plus grande que le sol est moins riche en engrais assimilables.

Quelle est la quantité d'humidité à donner au sol sous les divers climats et pour les diverses cultures ? Il est impossible de répondre nettement à la question ainsi posée. La quantité indispensable d'humidité dépend beaucoup de la nature du sol ; c'est un minimum qu'il faut surtout considérer, car l'excès d'eau n'est généralement pas nuisible du moment que cette eau ne reste jamais stagnante.

2° **Action chimique des eaux.** — Si l'action des eaux comme source d'humidité est indépendante des substances qu'elles tiennent en dissolution, il n'en est point de même de leur action chimique.

La quantité de matière fertilisante déposée dans le sol par les eaux qui le parcourent est essentiellement variable avec leur composition chimique.

En réalité, une eau d'irrigation joue toujours un double rôle : elle apporte de l'humidité, d'une part, et, d'autre part, elle constitue un engrais.

Si bien qu'en employant une grande quantité d'eau on peut fixer dans le sol assez de matières fertilisantes pour être dispensé de l'emploi des engrais ordinaires.

C'est M. l'ingénieur en chef Hervé-Mangon, membre de l'Institut, qui, par de longues et délicates expériences, a mis nettement en lumière les propriétés des eaux d'irrigation.

Expériences de M. Hervé-Mangon [1]. — Pour se rendre compte de l'action des eaux d'irrigation, M. Mangon a fait porter ses expériences sur deux champs placés aux deux climats extrêmes de la France, dans le département de Vaucluse et dans les Vosges. Il a mesuré exactement les volumes d'eau employés à l'irrigation, il a analysé l'eau à l'entrée et à la sortie de manière à calculer la somme des substances enlevées ou laissées au sol ; il a, de plus, pesé les récoltes obtenues et les engrais employés. De la sorte, il a pu établir une balance exacte entre la production et la consommation.

[1] *Expériences sur l'emploi des eaux dans les irrigations sous différents climats et sur la proportion des limons charriés par les cours d'eau*, par M. Hervé-Mangon, membre de l'Institut, 2e édit., 1869 ; 1 vol. chez Dunod éditeur.

Voici les résultats résumés de ses remarquables expériences :

1° L'azote, contenu dans les eaux à l'état de combinaison, se fixe dans les récoltes comme le fait l'azote des engrais;

2° La proportion d'azote ainsi empruntée aux eaux par les plantes est d'environ 30 0/0 du poids d'azote que ces eaux renferment. Le sol ne semble donc pas pouvoir épuiser les eaux au delà d'une certaine proportion.

3° Le sol ne paraît point prendre d'azote aux eaux d'irrigation pendant la saison froide quand la température est au-dessous de 7°. L'azote n'est donc assimilé que pendant la saison chaude.

4° La lumière a aussi une influence certaine sur la fixation de l'azote, et cette fixation est ralentie pendant la nuit.

5° L'acide carbonique est plus abondant dans les eaux à la sortie qu'à l'entrée. — L'oxygène, au contraire, est plus abondant à l'entrée qu'à la sortie. Les eaux d'irrigation déterminent donc dans le sol des phénomènes de combustion lente, semblables à ceux que le drainage produit. Les quantités d'oxygène entrées et sorties par hectare et par saison dans une prairie du Midi étaient respectivement égales à 74 mètres cubes et à 9 mètres cubes, il en résulte une disparition d'oxygène égale à 65 mètres cubes, soit plus de 90 kilogrammes. — Dans l'une des prairies des Vosges, ce chiffre s'est élevé à plus de 7000 kilogrammes.

6° Certaines eaux abandonnent plus facilement leur azote que d'autres eaux qui paraissent aussi riches. Ainsi, les eaux de la Sorgue (Vaucluse), aussi riches en azote que celles de la Durance, mais chargées d'acide carbonique, n'abandonnent que 13 0/0 de leur azote tandis que celles de la Durance en abandonnent 30 0/0.

Nous ne pouvons décrire ici les détails d'expérience et les procédés d'analyse inaugurés par M. Mangon; le lecteur les trouvera dans l'ouvrage de ce savant ingénieur.

Les chiffres consignés au tableau suivant résument les résultats :

	PRAIRIE DE TAILLADES (VAUCLUSE).	LUZERNE DE TAILLADES (VAUCLUSE).	HARICOTS DE TAILLADES (VAUCLUSE).	PRAIRIE DE L'ISLE (VAUCLUSE).	PRAIRIE DE SAINT-DIÉ (VOSGES).	PRAIRIE DE HABEAURUPT (VOSGES).
Volume total d'eau versé par hectare et par an.	16383 m.c.	37959 m.c.	5126 m.c.	5402 m.c.	1548661 m.c.	4483722 m.c.
Débit continu correspondant par seconde et par hectare.	1 lit,89	4 lit,39	0 lit,99	1 lit,13	68 lit,67	217 lit,13
Débit continu par seconde et par hectare, l'hiver.	»	»	»	»	101,28	312,83
Débit continu par seconde et par hectare, l'été.	»	»	»	»	33,74	49,93
Azote de l'ammoniaque et de l'acide azotique par litre d'eau d'entrée (moyenne de l'année) en milligrammes.	1 mill,585	1 mill,522	1 mill,773	1 mill,580	1 mill,380	1 mill,194
Azote de l'ammoniaque et de l'acide azotique par litre d'eau de sortie (moyenne de l'année).	1,022	1,021	»	1,365	1,247	1,136
Proportion d'azote fixé (moyenne de l'année).	0,36	0,35	»	0,15	0,10	0,05
Proportion d'azote fixé (moyenne de l'hiver).	»	»	»	»	0,05	0,015
Proportion d'azote fixé (moyenne de l'été).	»	»	»	»	0,32	0,30
Poids d'azote pris à l'eau d'irrigation par hectare et par an.	25k,44	56k,75	9k,09	8k,09	207k,88	261k,11
Poids d'azote du fumier.	121,88	105,80	87,66	139,72	»	»
Poids d'azote de la récolte.	184,34	431,54	103,96	165,86	70,86	102,66
Différence entre l'azote de la récolte et l'azote du fumier et de l'eau combinés.	+ 39,02	+ 271,28	+ 7,2	+ 18,41	— 135,68	— 155,99
Acide carbonique dissous par litre d'eau d'entrée (moy. de l'année). .	4 c.c,87	4 c.c,30	6 c.c,1	11 c.c,1	1 c.c,4	1 c.c,13
Acide carbonique dissous par litre d'eau de sortie (moy. de l'année). .	5,29	4,80	»	13,6	1,60	1,48
Oxygène dissous par litre d'eau d'entrée (moyenne de l'année). . . .	4,54	4,80	4,1	5,7	7,60	7,64
Oxygène dissous par litre d'eau de sortie.	3,78	4,20	»	1,7	7,10	7,22

La prairie, la luzerne et les haricots de Taillades étaient arrosés par les eaux dérivées de la Durance; la prairie de l'Isle par les eaux de la Sorgue. Ces quatre cultures n'étaient soumises qu'à des arrosages périodiques, ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

Pour les prairies des Vosges, les arrosages sont continus et même plus abondants en hiver qu'en été.

La différence qui saute le plus aux yeux est dans les quantités d'eau employées :

1° Dans le Midi, on se contente d'environ 1 litre par hectare et par seconde.

2° Dans les Vosges, le volume des eaux correspond, pour une prairie, à un débit continu de plus de 200 litres à la seconde.

Mais, en revanche, les cultures du Midi absorbent beaucoup de fumier; les prairies des Vosges n'en reçoivent pas, et puisent dans les eaux tous les éléments nutritifs dont elles ont besoin.

L'eau d'irrigation est un engrais. — L'eau d'irrigation est un engrais, en ce sens qu'elle tient toujours en dissolution des gaz et des substances minérales dont elle abandonne à la terre une certaine proportion.

Mais si le volume d'eau employé est trop faible, 1 litre par seconde, par exemple, la quantité d'engrais qu'il abandonne au sol est insignifiante; de plus, comme la présence de l'humidité donne lieu à une végétation plus active, il faut fumer la terre à plus haute dose que si elle n'était pas irriguée. C'est ainsi que s'expliquent les faits signalés par M. Nadault de Buffon : il n'a pas tort de dire que, dans les irrigations à faible consommation d'eau, la consommation de fumier est considérable.

A mesure que le volume employé augmente, la quantité d'engrais que l'eau porte avec elle vient en déduction de celle qu'il fallait demander au fumier ; il arrive un moment où l'eau suffit à compenser les pertes du sol; le fumier devient alors inutile.

C'est ainsi que s'explique la fertilité des prairies des Vosges et de Normandie, qui donnent chaque année d'abondantes récoltes, bien qu'elles ne reçoivent pas de fumier.

Distinction entre les arrosages simples et les irrigations fertilisantes. — Une eau étant donnée, elle produira sur les cultures un effet d'arrosage simple ou d'irrigation fertilisante, suivant la dose à laquelle on l'emploiera.

Employée à faible volume, elle ne fait que porter à la terre l'humidité nécessaire à la végétation, et elle ne diminue pas la consommation du fumier; elle l'augmente même par rapport aux champs voisins, puisqu'elle engendre une végétation plus active.

A mesure qu'augmente le volume employé, l'influence de l'eau comme engrais se fait sentir, et l'on peut recourir à des quantités de fumier décroissantes.

Il arrive un moment où le volume d'eau suffit à lui seul à compenser les pertes du sol. Le fumier devient alors inutile.

Quand cette proportion est atteinte, ce serait du gaspillage que de forcer encore le volume, puisqu'on donnerait à la terre plus d'engrais qu'elle n'en réclame. Mieux vaut répartir l'excès sur les champs voisins.

Quantité d'eau à employer. — Il y a donc une chaîne ininterrompue entre l'arrosage simple et l'irrigation fertilisante.

Tout dépend du volume d'eau qu'on emploie, et on ne saurait le préciser

d'avance : il faut demander au fumier le complément de l'engrais que l'eau ne fournit pas, et ce complément peut varier de la totalité à zéro.

Connaissant, d'une part, la composition chimique et le volume des eaux employées ; connaissant, notamment, leur teneur en azote et en acide phosphorique, ainsi que la proportion de ces matières que les eaux abandonnent au sol ; connaissant, d'autre part, le poids et la composition chimique de la récolte (Voir, à ce sujet, les tableaux que nous avons donnés en culture rationnelle), il sera facile d'établir une balance entre l'apport et l'enlèvement, et de déterminer la proportion de fumier qu'il convient d'employer dans chaque cas, concuremment avec les eaux d'irrigation.

Dans les climats chauds, où sans eau on ne récolte rien, il est évident qu'on a avantage à répartir les eaux sur la plus grande surface possible ; dans les pays du Nord, il peut y avoir avantage, au contraire, à concentrer l'emploi des eaux sur une surface restreinte, afin d'économiser les engrais.

Bien que l'expérience en ces matières soit un guide précieux et tende à corriger les défauts des systèmes en usage, il n'en est pas moins vrai que bien des pratiques vicieuses existent encore en matière d'irrigation, pratiques que des recherches scientifiques, faites pendant longtemps et avec soin, pourraient sans doute faire disparaître.

Qualités des eaux de colature. — Les eaux de colature sont celles que l'on recueille pour les employer à nouveau après qu'elles ont déjà servi à l'irrigation des terres.

En général, les eaux de colature ne valent plus rien comme engrais, puisqu'elles ont abandonné au sol qu'elles quittent la proportion disponible des matières fertilisantes qu'elles contenaient.

Mais, lorsqu'elles voyagent quelque temps dans de nouveaux canaux, elles perdent de l'acide carbonique et reprennent de l'oxygène ; elles recueillent aussi dans leur route de nouvelles substances organiques. Elles peuvent arriver en somme à recupérer à peu près leur qualités premières.

Il y a même des cas où les eaux de colature sont meilleures que les eaux premières ; ainsi, les eaux provenant de la fonte des neiges des montagnes et dérivées d'un lac, sont trop pures et trop peu aérées pour produire bon effet tout d'abord, mais, après avoir servi une première fois à l'irrigation, elles se sont chargées en courant sur le sol d'air et de substances minérales et organiques ; quelquefois même elles se sont réchauffées. Il arrive alors qu'elles sont devenues beaucoup plus efficaces.

On ne peut donc présenter à ce sujet des conclusions absolues : ces conclusions dépendent des circonstances.

Des eaux nuisibles en irrigation. — Il est bien rare que l'on rencontre des eaux d'irrigation nuisibles. Elles peuvent être peu chargées de principes fertilisants, mais elles agissent toujours par leur humidité, et, sous ce rapport, une eau, même chimiquement pure, serait encore très-utile dans les pays chauds.

Toutes les eaux provenant des rivières qui traversent des pays cultivés sont bonnes ; celles qui sont poissonneuses ne peuvent être plus mauvaises pour la végétation qu'elles ne le sont pour la vie animale. Tout ruisseau, dont les bords sont marqués par une herbe verte et touffue, ne peut donner que de bonnes eaux d'irrigation.

Il y a des eaux acides qui sont mauvaises ; ce sont celles qui s'échappent des tourbières ou des bois, notamment des bois de chêne, parce qu'elles sont

chargées d'acide tannique. Les eaux acides ne sont pas favorables à la végétation.

Les eaux chargées de sulfate de fer sont très-mauvaises pour les prairies; cependant ces eaux pouront donner de bons résultats sur un sol calcaire.

Pour un sol donné, les meilleures eaux sont celles qui proviennent d'un sol différent : sur un sol calcaire, les eaux provenant des granites ou des argiles apporteront les alcalis qui manquent : sur un sol argileux, des eaux calcaires produiront bon effet.

Combinaison du drainage et de l'irrigation. — Ainsi que l'a fait remarquer M. l'inspecteur général Belgrand, membre de l'Institut, dans ses *Études hydrologiques sur le bassin de la Seine*, il est des cas où le drainage et l'irrigation combinés sont favorables à la culture.

Le drainage ne convient pas aux prairies des terrains imperméables, puisqu'il aurait pour effet de donner à ces terrains les qualités des terrains perméables, et d'y rendre impossible par conséquent l'existence des prairies naturelles.

Mais le drainage est bon pour les prairies des vallées tourbeuses et perméables, vallées à faible pente dans lesquelles on trouve souvent à droite et à gauche des parties marécageuses plus basses que le lit du cours d'eau.

Dès que ces prairies sont drainées, les lèches et les mauvaises herbes disparaissent; seulement, il faut donner à la végétation l'humidité nécessaire, en complétant le drainage par un système d'irrigation souvent assez facile à établir.

M. Belgrand signale d'excellents résultats obtenus par ce procédé.

Étendue des irrigations en France. — L'étendue des terrains régulièremens arrosés ne paraît pas devoir être évaluée à plus de 100 000 hectares pour la France entière.

« La surface totale des terrains régulièrement arrosés, dit M. Mangon, utilise à peine le vingtième des eaux disponibles et représente une fraction insignifiante des prairies naturelles de notre pays.

A l'exception de la Durance, assez bien utilisée dès à présent, tous nos grands cours d'eau ne fournissent, pour ainsi dire, rien à l'agriculture. Le Rhône coule inutile au milieu des plaines desséchées du Midi, la Seine, la Loire, le Rhin, etc., n'alimentent aucune irrigation importante et leurs affluents secondaires ne sont guère mieux employés. »

On évalue à 180 milliards de mètres cubes le volume total des eaux versé chaque année à la mer par tous les fleuves de France, grands et petits.

On a trouvé dans la Seine, à Paris, $0^{gr},17$ d'ammoniaque par mètre cube (Poggiale) ; dans le Rhin, on en a trouvé en juin 1853 $0^{gr},48$ et en octobre, $0^{gr},17$. L'eau de pluie, d'après Boussingault, renferme $0^{gr},79$ d'ammoniaque par mètre cube.

Par mètre cube, on a trouvé dans la Seine, à Bercy 14 grammes d'azotates, on en a trouvé 8 grammes dans le Doubs et dans le Rhône et 4 grammes seulement dans le Rhin à Strasbourg.

On est donc fondé à dire que nos fleuves entraînent à la mer, chaque année, plus de 30,000 tonnes d'ammoniaque, et 15,000,000 tonnes d'azotates solubles.

En se reportant à nos tableaux de culture, on reconnaît que cela représente la fécondité pour bien des milliers d'hectares.

Il y a donc un champ indéfini ouvert aux grands travaux d'irrigation.

Méthodes diverses d'irrigation. — Il existe plusieurs méthodes d'irrigation qui, d'un pays à l'autre, se différencient par des détails.

1° La méthode la plus simple est l'irrigation irrégulière, dans laquelle les eaux dérivées circulent dans des canaux et rigoles placés sur toutes les lignes

de faîte du terrain; ces canaux sont barrés de distance en distance et les eaux se déversent à droite et à gauche; elles courent en mille filets à la surface du sol, et se réunissent dans les thalwegs, où se trouvent les canaux et rigoles de colature ou d'égouttement.

2° Le système d'irrigation par ados est peut être le plus usité. — La terre à arroser est disposée en planches inclinées, de telle sorte que la surface ressemble à une série de toits à deux égouts ou de billons juxtaposés.—Sur le faîte de chaque toiture est une rigole d'alimentation qui déverse ses eaux à droite et à gauche; celles-ci, après avoir produit leur effet, trouvent au pied des versants les rigoles d'égouttement. — L'irrigation par épis de blé est une variété du système des ados.

3° Le système d'irrigation par submersion convient aux terrains plats et à certaines cultures. Le sol est divisé en bassins rectangulaires limités à des bourrelets en terre; on admet périodiquement dans les bassins une couche d'eau d'une certaine épaisseur qu'on renouvelle de temps en temps ou qui se renouvelle d'une manière continue.

4° La méthode d'irrigation par rigoles de niveau convient aux terrains inclinés. — Les eaux sont dérivées dans des rigoles placées à fleur de coteau suivant les lignes de niveau; elles se déversent à l'aval et se répandent en nappe sur une bande plus ou moins large. — L'excès de liquide est recueilli soit par la rigole de niveau inférieure, soit par des colatures établies suivant les lignes de plus grande pente.

Autant l'eau courante est favorable à la végétation, autant l'eau stagnante lui est funeste. Le principe d'une irrigation bien combinée est donc que l'eau doit arriver partout en égale quantité et ne séjourner nulle part.

Nous n'avons fait qu'énumérer les diverses méthodes d'irrigation; elles seront décrites en détail dans les exemples qui vont suivre.

Ces exemples sont rangés en deux grandes classes:

1° Irrigations fertilisantes, ou à grande consommation d'eau, en usage dans les pays du Nord;

2° Arrosages simples, ou irrigations à faible consommation d'eau, en usage dans les pays du Midi.

I

IRRIGATIONS FERTILISANTES A GRANDE CONSOMMATION D'EAU

PRATIQUÉES DANS LES CLIMATS DU NORD

1° Irrigations de Normandie

PRAIRIES IRRIGUÉES DES ENVIRONS DE BERNAY. — 1er EXEMPLE.

Les irrigations se présentent sous une forme très-intéressante dans certaines parties de la Normandie, notamment dans le département de l'Eure, aux environs de Bernay.

La planche XVI représente une grande prairie située immédiatement à l'aval de Bernay, et arrosée par les eaux de la Charentonne, rivière qui se réunit à la Rille à Serquigny. Les sources de la Charentonne se trouvent sur la formation géologique imperméable qui porte le nom d'argiles et meulières de Satory.

Cette rivière traverse ensuite des plateaux argilo-caillouteux appartenant au bassin d'Eure; les argiles imperméables de ces plateaux sont drainées par la formation crayeuse qu'elles recouvrent; aussi ne conservent-elles que peu d'humidité. Néanmoins, l'influence de la partie supérieure du bassin se fait sentir lors des crues et donne lieu à des eaux troubles et limoneuses.

La Charentonne coule dans une vallée à versants fortement inclinés, et cette vallée a une largeur de quelques centaines de mètres avec une profondeur de 35 à 40 mètres.

Au fond de la vallée d'érosion apparaissent le grès vert et le gault, sables et argiles imperméables, appartenant au terrain crétacé.

Le sol imperméable de la vallée de la Charentonne est, comme nous le savons, éminemment propre à la culture des prairies naturelles, et la vigueur de cette végétation y est encore accrue par d'abondantes irrigations.

Le type le plus remarquable est celui de la prairie que représente la planche XVI; cette prairie appartient à un seul propriétaire. Elle est sillonnée par une multitude de rigoles qui s'appellent les unes les rigoles porteuses ou simplement les porteurs, et les autres les rigoles d'égout ou simplement les égouts.

Les porteurs reçoivent les eaux d'irrigation et les répandent par déversement sur les parties de la prairie qui les bordent latéralement; les porteurs se trouvent donc sur toutes les lignes de faîte, au sommet des ados naturels ou artificiels.

Les égouts recueillent les eaux après qu'elles ont parcouru la prairie et l'ont fécondée en lui abandonnant leurs principes fertilisants.

On trouve les égouts dans tous les thalwegs.

Les porteurs sont les artères de la prairie;

Les égouts en sont les veines.

Les rigoles de chaque nature se réunissent dans des fossés ou canaux principaux qui se rejoignent en un tronc commun.

C'est absolument l'image de la circulation animale, et le mécanisme de la nutrition est le même.

Les porteurs sont marqués sur le plan par une teinte foncée et les égouts par une teinte claire; en effet, les eaux troubles ou impures circulent dans les porteurs; les eaux clarifiées sont recueillies par les égouts.

En descendant vers l'aval, une rigole d'égout peut se transformer en porteur à cause de la disposition des lieux; les eaux se trouvent ainsi reprises et servent plusieurs fois avant de retourner épuisées à la rivière.

Si le lecteur veut suivre attentivement sur le plan, nous allons le parcourir avec lui de l'amont à l'aval.

La prairie, d'une contenance totale d'environ 18 hectares, est limitée au nord par le bras supérieur de la Charentonne, et au sud par le bras inférieur; à l'est et à l'ouest, ces deux bras sont réunis par des canaux de décharge faisant suite aux vannages régulateurs de deux usines; du côté d'amont, à l'ouest, est une filature; du côté d'aval, à l'est, est le moulin de Saint-Léonard.

Partons de l'amont. La prise d'eau d'irrigation, fermée en tête par une vanne de $1^{m},03$ de large sur $1^{m},18$ de hauteur, se trouve en A, et le porteur principal AB se bifurque en B; il lance à gauche une branche BD qui se trifurque en D, et chacun des trois canaux qui en résultent alimente un certain nombre de porteurs du dernier ordre; quant à la seconde branche BC, elle se prolonge parallèlement au bras inférieur de la Charentonne; elle le longe en lançant sur sa gauche une série de porteurs dirigés suivant les lignes de faîte du terrain.

On remarquera que le bras inférieur de la Charentonne occupe en réalité le thalweg de la vallée; le bras supérieur a toutes les apparences d'une déviation remontant à une époque reculée, déviation ayant pour but de créer des chutes et de faciliter l'arrosage.

En examinant avec soin les rigoles du dernier ordre, on reconnaîtra que quelques-unes se transforment d'égouts en porteurs et inversement, suivant le relief du sol.

Les parties de la prairie qui longent le bras supérieur de la Charentonne, en face de la filature, sont arrosées par des prises d'eau spéciales, comme le montre le plan.

Quelques rigoles d'égout aboutissent dans le canal de décharge EF, qui prend naissance immédiatement en amont de l'appareil hydraulique de la filature; mais la plupart se réunissent dans le tronc commun GH, qui se prolonge à l'aval par le grand égout HIKL.

La description précédente comprend l'irrigation de la partie de la prairie située en amont de GH. La partie d'aval possède un système distinct et s'alimente dans le bras inférieur de la Charentonne.

Les eaux de ce bras inférieur sont, pendant les heures consacrées aux irrigations, relevées par le barrage de la Pile M, lequel comprend six vannes de chacune $1^{m},05$ de largeur.

L'alimentation se fait donc par des eaux prises directement à la rivière, et non par des eaux déjà épuisées qui proviendraient des égouts de la prairie d'amont.

Le barrage M fait refluer les eaux dans deux porteurs principaux; l'un NP,

transversal à la prairie, la coupe perpendiculairement aux deux bras de la Charentonne; il lance sur sa droite des porteurs secondaires, et se retourne d'équerre à son extrémité pour former un nouveau porteur principal PST parallèle au thalweg de la vallée;

L'autre porteur MQR lance à droite et à gauche de nombreuses rigoles secondaires; il se bifurque en R et en U, et les canaux qui s'en détachent vont porter les eaux fertilisantes dans toutes les parties de la prairie.

L'irrigation de la partie située au nord de PST, le long du bras supérieur de la Charentonne, est obtenue directement au moyen de prises d'eau faites dans ce bras supérieur.

Quant au système d'égout, il est suffisamment indiqué par le plan; son tronc principal est la ligne IKL, déjà citée, parallèle aux deux bras de la rivière et à peu près à égale distance de ces deux bras.

Toutes les prises d'eau, toutes les bifurcations importantes, sont munies de vannes que l'on manœuvre successivement; pendant les basses eaux, on ne pourrait gonfler à la fois tous les porteurs, et on comprend qu'il faut procéder méthodiquement.

A côté de toutes les vannes sont inscrites leurs dimensions.

Le plan porte en outre de nombreuses cotes d'altitude qui sont toutes rapportées à un plan de comparaison situé au-dessus du sol, de sorte que les pentes vont des cotes les plus faibles vers les plus fortes.

Le relief de la prairie est, du reste, peint aux yeux par les lignes des porteurs et des égouts, qui constituent un véritable plan coté.

Augets. — Il arrive souvent que des rigoles d'irrigation passent soit sur un bras de la rivière, soit sur une rigole d'égout : ce cas se présente en amont du barrage de la Pile; le porteur NP passe au-dessus de l'égout HI.

Le passage se fait au moyen d'un auget en bois supporté par deux culées en maçonnerie ou, plus souvent, par deux petites palées en charpente.

S'il s'agissait d'une traversée importante, de quelques mètres de portée, par exemple, il y aurait avantage à employer un auget en tôle qui dispenserait de tout support intermédiaire.

La figure 4 de la planche XV représente la section transversale d'un de ces augets que nous avons projetés. Il se compose de deux feuilles de tôle verticales de $0^m,005$ d'épaisseur et de $0^m,50$ de hauteur; ces feuilles de tôle sont renforcées haut et bas par des cornières de $\frac{60.60}{6}$, et le fond est formé d'une feuille de tôle ayant également $0^m,005$ d'épaisseur; elle est rivée avec les branches horizontales des cornières inférieures. La largeur libre de l'auget est de $0^m,40$.

Lorsqu'il est plein, il porte donc 200 litres d'eau par mètre courant; il porte en outre 80 kilogrammes de fer. Si on fait le calcul de résistance pour une charge uniformément répartie de 280 kilogrammes par mètre courant, en négligeant la feuille de tôle du fond et en assimilant ce qui reste à une section en double T, on trouve que l'effort maximum pour une portée de 12 mètres atteindra un peu plus de 5 kilogrammes par millimètre carré. Il y a donc toute sécurité, puisque le maximum admis est de 6 kilogrammes.

Si l'on adoptait pour un pareil auget une ligne horizontale lors de la construction, on obtiendrait après la pose un effet des plus disgracieux, car la poutre métallique ainsi constituée prendrait une flèche très-sensible à l'œil. Dans le cas qui nous occupe, on donnera en construction à l'auget une flèche

de $0^m,02$ à $0^m,03$ et on augmentera d'autant sa hauteur, afin d'être assuré d'avoir toujours une section d'écoulement de $0^m,50$ de hauteur.

Les deux joues de l'auget auraient tendance à s'écarter sous la pression latérale de l'eau; on les réunira tous les mètres à leur partie supérieure par de petites bandes de tôle horizontale.

Frais d'exploitation et produit de ces prairies. — Les frais d'exploitation d'un hectare de ces prairies baignantes (c'est le terme consacré), comprenant la récolte du foin et du regain, s'établissent comme il suit :

		Francs.
BAIGNAGE.	Un gardien baigneur par 25 hectares de prairies, à 1200 fr. par an, soit pour 1 hectare.	48
RIGOLAGE.	6 journées d'homme à 3 francs.	18
FAUCHAISON. . . .	8 journées d'homme à 5 francs.	40
FENAISON.	2 journées d'homme à 3 francs.	6
—	8 journées de femme à 1 fr. 50.	12
BOTTELAGE.	8 journées d'homme à 5 francs.	40
RENTRÉE DES FOINS.	2 journées de cheval et de voiture à 4 fr.	8
—	2 journées de charretier chargeur à 3 francs. . .	6
—	2 journées d'aide-chargeur à 3 francs.	6
—	2 journées de déchargeur à 3 francs.	6
—	2 journ. d'enfant pour approcher les bottes à 2 fr.	4
—	2 journées de tasseur à 3 francs.	6
	Total.	200

Le chiffre de 200 francs, ainsi établi, se rapporte à une grande exploitation, comme celle de la prairie que nous avons décrite; il serait trop faible s'il s'agissait de propriétés morcelées et éloignées du lieu de résidence de l'exploitant, il faudrait dans ce cas le porter à 260 francs.

Un hectare de prairies baignantes rapporte dans une bonne année 4,000 bottes de foin pesant 2 kilogrammes 1/2.

Le prix des cent bottes peut varier de 20 à 50 francs, suivant le besoin qu'on a des fourrages.

La prairie que nous avons décrite se vendrait de 8,000 à 10,000 francs l'hectare ; depuis bon nombre d'années, on peut compter sur un intérêt net de 5 0/0 du capital.

Ces chiffres s'appliquent aux prairies situées immédiatement à l'aval de Bernay; en descendant la vallée, on trouve des prix plus faibles. Nous en dirons tout à l'heure la cause probable.

Consommation d'eau dans ces irrigations. — Ce qu'il y a de remarquable dans ces irrigations de la Normandie, c'est l'énorme quantité d'eau qu'on y consomme.

Ce n'est pas, en effet, un simple arrosage : c'est un baignage complet, ainsi que le prouve le nom de prairies baignantes.

La première partie de la prairie, que représente la planche XVI, est desservie par une vanne de 1 mètre carré de section pour une surface de 5 à 6 hectares. Lors des grosses eaux, il se produit au passage de cette vanne des vitesses de 1 mètre à la seconde; c'est donc un débit de 1 mètre cube à la seconde qui se répand sur la surface que nous venons de dire, et la part de chaque hectare atteint plus de 200 litres à la seconde. Nous sommes loin des simples arrosages du Midi à la dose d'un litre par seconde.

Nous allons montrer par d'autres exemples la valeur du volume d'eau em-

ployé aux irrigations de cette partie de la Normandie : en eaux ordinaires, la Risle débite 23 mètres cubes à la seconde; elle sert à l'irrigation, de 1,467 hectares de prairies; tout le débit est absorbé par cette irrigation et l'écoulement est interrompu. La part de chaque hectare est donc de près de 16 litres par seconde, et cette part est beaucoup plus considérable lors des crues.

Sur le cours de la Charentonne, 813 hectares sont irrigués : en eaux ordinaires, la consommation est de 4 litres et demi par hectare à la seconde; en temps de crue, elle peut atteindre 200 litres.

Les prairies ne reçoivent jamais d'engrais. — Cette abondante consommation explique pourquoi les prairies qui nous occupent ne reçoivent jamais d'engrais. Les bestiaux ne peuvent jamais y séjourner et on n'y dépose jamais un atome de fumier.

Les matières nutritives nécessaires à la végétation sont en effet fournies par les eaux, qui agissent surtout par effet chimique. Sur ces prairies à sous-sol argileux, un simple arrosage ne servirait pas; le baignage, tel qu'il est pratiqué, est au contraire éminemment utile, puisqu'il donne chaque année une forte récolte sans dépense d'engrais.

Il n'y a pas de terre dont la fertilité soit inépuisable; un sol qui donne chaque année d'abondantes moissons exige une nourriture qui répare ses forces.

Cette nourriture, les prairies de la vallée de la Charentonne la puisent dans les eaux qui la recouvrent, et surtout dans les eaux légèrement limoneuses.

Ce qui explique, suivant nous, la grande valeur des prairies situées immédiatement à l'aval de Bernay, c'est précisément leur position. La ville de Bernay, qui compte plusieurs milliers d'habitants, est traversée par plusieurs bras de rivières qui sont les réceptacles de toutes les immondices et des égoûts de la ville. A l'aval, les eaux sont donc très-riches en matières organiques, qui profitent surtout aux premières prairies sur lesquelles ces eaux s'épanchent; à quelques kilomètres plus loin, les eaux rentrées à la rivière sont en partie épuisées, elles sont moins actives, les prairies sont moins riches et moins productives.

C'est un phénomène analogue à celui que depuis longtemps on a signalé pour les prairies arrosées par les eaux qui s'échappent de la ville de Milan.

Réglementation. — Sur toutes les rivières de Normandie, les chutes sont utilisées avec soin, il n'en reste guère de disponibles. On rencontre donc partout d'importantes usines qu'on ne peut mettre en chômage à volonté.

Il a fallu établir un juste partage des eaux entre l'agriculture et l'industrie.

A l'agriculture, on a réservé les dimanches et les nuits; à l'industrie restent les jours.

Il est à remarquer, du reste, que, pendant les basses eaux, les irrigations d'été sont, en somme, plus favorables que nuisibles aux usines; les eaux, en effet, se répandent pendant la nuit sur les prairies qui se transforment en réservoirs et concourent efficacement à l'alimentation diurne des rivières. L'eau qui, pendant la nuit, se serait rendue à la mer, s'est trouvée ralentie dans sa course et mise en réserve pour les besoins du jour suivant.

Le partage des eaux est réglé par les arrêtés préfectoraux ci-après, établis d'après les bases sommaires que nous venons d'exposer :

Nous, préfet du département de l'Eure,

Vu les arrêtés préfectoraux des 24 avril 1850, 1er juin 1854 et 12 juin 1855, qui ont réglé provisoirement les irrigations dans les vallées de la Charentonne et du Ternant;

Vu les pièces de l'enquête ouverte dans les communes intéressées, du 7 au 22 juillet 1856, ensemble le projet de règlement présenté par la Commission instituée par notre arrêté du 1er octobre 1856;

Vu le rapport de MM. les Ingénieurs des ponts et chaussées, des 20 et 23 décembre 1856,

Vu les lois des 12 et 20 août 1790 et 6 octobre 1791,

ARRÊTONS :

ARTICLE 1er.

L'irrigation dans les vallées de la Charentonne et du Ternant sera régie, à partir du 1er janvier prochain, conformément aux dispositions suivantes.

ART. 2.

La première section, comprenant la rivière de Guel, ou du Ternant, depuis la limite du département de l'Orne jusqu'à son embouchure dans la Charentonne, et la Charentonne depuis la limite de ce même département jusqu'au pont de Broglie, profitera de l'irrigation du 15 mars au 15 juin et du 25 juillet au 15 septembre, du samedi à 7 heures du soir au lundi à 3 heures du matin, et du 1er décembre au 15 mars, du samedi à 7 heures du soir au lundi à 5 heures du matin.

ART. 3.

La seconde section, commençant au pont de Broglie et s'étendant jusqu'au pont de Boucheville à Bernay, et la troisième section commençant au pont de Boucheville et se terminant à l'embouchure de la Charentonne dans la Risle, profiteront de l'irrigation du 15 mars au 15 juin et du 25 juillet au 15 septembre, du dimanche à 3 heures du matin au lundi à à 3 heures du matin, et du 1er décembre au 15 mars, du dimanche à 5 heures du matin au lundi à 5 heures du matin.

ART. 4.

La seconde section profitera en outre de l'irrigation du mardi soir au mercredi matin, du jeudi soir au vendredi matin, et du vendredi soir au samedi matin, pendant sept heures, savoir : du 15 mars au 15 juin et du 25 juillet au 15 septembre, de 7 heures du soir à 2 heures du matin, et du 1er décembre au 15 mars, de 10 heures du soir à 5 heures du matin.

ART. 5.

La troisième section profitera en outre de l'irrigation toutes les nuits pendant sept heures, savoir : du 15 mars au 15 juin et du 25 juillet au 15 septembre, de 8 heures du soir à 3 heures du matin, et du 1er décembre au 15 mars, de 10 heures du soir à 5 heures du matin.

Néanmoins la partie de la troisième section commençant en aval de l'usine de Saint-Léger et finissant au moulin de Camfleur, ne profitera pas de l'irrigation dans la nuit du mardi au mercredi, ni dans celle du vendredi au samedi.

ART. 6.

Pendant les gelées, l'irrigation de nuit sera réduite dans la deuxième et dans la troisième section, à 6 heures. Dès que les prairies seront glacées, l'irrigation devra cesser dans toutes les sections.

ART. 7.

Dans les trois sections, les vannes de prises d'irrigation pourront encore être ouvertes toutes les fois que, par suite des crues d'eau dites avalaisons, les usiniers seront forcés d'ouvrir leurs vannes de décharge pour maintenir les eaux aux repères régulateurs des retenues.

Dans ces circonstances et lorsque les vannes d'irrigation suffiront pour régler le niveau du bief, les usiniers devront baisser leurs vannes de décharge.

ART. 8.

En aucun temps et dans aucune circonstance, les usiniers ne pourront lever leurs vannes de décharge de façon à faire baisser l'eau d'une manière sensible au-dessous des repères de leurs usines. Il leur est interdit de transmettre l'eau d'une manière irrégulière, par leur fait, aux usines inférieures.

ART. 9.

Les propriétaires ou locataires de prairies ou d'usines, pour s'affranchir des poursuites directes qui pourraient être intentées contre eux à raison des contraventions, et sauf la responsabilité civile qui leur incombe, devront faire déclaration par écrit, au garde-rivière, des nom et demeure des préposés chargés de l'irrigation et du soin de leurs prairies ou de la marche de leurs usines. Le garde-rivière donnera un récépissé de cette déclaration.

ART. 10.

Il pourra être fait des règlements particuliers, pour les propriétés ou les fractions de la rivière qui se trouveront dans des conditions spéciales.

ART. 11.

Les règlements administratifs relatifs à la police des rivières sont maintenus en tant qu'ils ne sont pas contraires aux dispositions du présent règlement.

ART. 12.

Pour l'exécution du présent règlement et des règlements auxquels il n'est pas dérogé, la surveillance sera exercée concurremment par les gardes-rivières, les commissaires de police des cantons de Broglie et de Bernay et les agents sous leurs ordres, et les conducteurs et agents des ponts et chaussées.

ART. 13.

Expédition du présent sera adressée à M. le sous-préfet de Bernay, chargé d'en faire la notification au syndicat institué par l'arrêté préfectoral du 23 novembre 1855, et d'y faire donner immédiatement la plus grande publicité dans toutes les communes intéressées.

Les articles 3, 4 et 5 de cet arrêté du 27 décembre 1856, ont été modifiés par un autre arrêté préfectoral du 19 septembre 1868 ainsi conçu :

ARTICLE 1er.

Les articles 3, 4 et 5 de l'arrêté préfectoral du 27 décembre 1856 portant règlement d'irrigation des rivières de Charentonne et du Ternant sont modifiés ainsi qu'il suit.

Art. 2.

Les propriétaires de prairies de la 3e section auront la faculté de profiter du baignage, accordé par les articles 3 et 5 de l'arrêté de 1856, jusqu'à la coupe et aussitôt l'enlèvement des herbes, pourvu que ce baignage ne nuise point aux récoltes des prairies voisines.

Art. 3.

Les propriétaires de prairies de la 2e section auront droit, comme les propriétaires de prairies de la 3e, de baigner toutes les nuits, moins toutefois, pour la 2e section, dans la nuit du dimanche, à partir de 5 heures du soir.

PRAIRIES IRRIGUÉES DES ENVIRONS DE BERNAY. — 2e EXEMPLE.

Le premier exemple que nous avons donné des prairies baignantes des environs de Bernay (Eure) comprenait une vaste étendue sur laquelle les canaux porteurs et les égouts étaient dirigés d'une manière irrégulière suivant le relief du terrain. Lorsqu'il s'agit d'irriguer une prairie plane, on est forcé de recourir à un autre système; on exécute des terrassements réguliers et la surface est disposée en ados ou billons; au sommet des ados se trouvent les porteurs; dans les thalwegs se trouvent les égouts.

L'eau qui pénètre dans les porteurs se déverse à droite et à gauche sur les plans inclinés de l'ados; elle circule dans les herbes, s'y dépouille de ses principes nutritifs et se rend aux égouts, qui la reconduisent à la rivière.

Les figures 1 à 3 de la planche XV représentent un type d'irrigation par ados s'appliquant à une prairie de 1 hectare 43 ares.

En haut de la prairie est la rivière qui se trouve en contre-bas et qui reçoit normalement le fossé d'égout principal.

Au bas du plan est le canal de prise d'eau; c'est une dérivation de la rivière faite à une certaine distance à l'amont de la prairie, de manière à créer une dénivellation suffisante.

Avant d'arriver à la prairie qui nous occupe, le canal de prise d'eau passe au moyen d'un auget sur un autre fossé d'irrigation.

Les cotes de nivellement sont prises par rapport à un plan supérieur de comparaison, de sorte que les pentes vont de la cote la plus faible à la cote la plus forte.

Le porteur principal est une rigole A B C, dont la largeur au plafond est à l'origine de $1^m,00$ et se réduit à $0^m,40$ à l'extrémité aval; le talus de chaque côté est de $0^m,20$ avec une profondeur de $0^m,50$. Une vanne de tête permet d'interrompre l'irrigation : sur le canal de prise d'eau est une vanne de barrage qui sert à faire gonfler les eaux jusqu'à la hauteur voulue. Le porteur principal est muni sur sa longueur de deux autres vannes B et C, ce qui permet d'arroser successivement les trois sections de la prairie en gonflant les eaux à l'amont de chaque vanne, lorsque le débit n'est pas suffisant.

Les profils en travers montrent les dispositions adoptées pour les ados, ainsi que pour les porteurs et égouts du dernier ordre.

Les petits porteurs ont à l'origine $0^m,30$ de profondeur sur $0^m,30$ de largeur; à l'extrémité aval, ils n'ont plus que $0^m,20$ sur $0^m,20$.

Les petits égouts ont à l'origine 0m,15 de largeur sur 0m,15 de profondeur; à l'extrémité aval, leurs dimensions sont 0m,25 de largeur et 0m,25 de profondeur.

Les égouts collecteurs ont à l'origine 0m,25 sur 0m,25, et à leur embouchure 0m,40 sur 0m,40.

Le prix des terrassements par hectare d'une prairie ainsi disposée s'élève de 250 à 300 fr.

2° Irrigations de la Campine belge

La Campine belge est une vaste plaine, sillonnée par de nombreux ruisseaux, d'une étendue d'environ 500,000 hectares, comprise entre la Meuse et l'Escaut, bornée au nord par la frontière hollandaise, au midi par la Dyle et le Demer, et comprenant une notable portion des provinces d'Anvers et du Limbourg.

Ce territoire était autrefois couvert de landes et de forêts; en 1848, il y en avait encore plus de la moitié qui consistait en bruyères improductives ou en marais tourbeux appartenant aux communes.

Le sol se compose d'un sable quartzeux, reposant sur un sous-sol d'argile imperméable, ou de tuf ferrugineux et recouvert d'une couche d'humus d'épaisseur variable.

Vers 1848, le gouvernement belge entreprit d'assainir et de fertiliser ce territoire.

Il y arriva en créant le canal de la Campine, grande artère entre la Meuse et l'Escaut; c'est un canal de 56 kilomètres de longueur, d'une section de 10 mètres au plafond, avec écluses de 5m,50 de large et d'une profondeur de 1m,65. La dépense totale s'est élevée à 5 millions et demi dont le quart environ, payable par annuités, a été mis à la charge des riverains.

En 1847 intervint la loi sur les défrichements, qui consacra le principe de l'expropriation des bruyères communales pour cause d'utilité publique, et donna au gouvernement les pouvoirs nécessaires pour poursuivre la grande œuvre d'amélioration agricole qu'il avait entreprise.

L'État commença par faire exécuter lui-même, sur 350 hectares de ces bruyères communales, tous les travaux préparatoires à l'irrigation, tels que rigoles d'alimentation et de colature, chemins d'exploitation, barrages, prises d'eau, ponts. Les parties ainsi préparées furent vendues au profit des communes, et les acquéreurs s'engageaient, 1° à rembourser les avances de l'État, 2° à exécuter la distribution intérieure et à pratiquer l'irrigation dans un délai déterminé.

L'exemple ainsi donné imprima une rapide impulsion à l'œuvre du défrichement et de la mise en valeur des bruyères, et bientôt les demandes de concession d'eau affluèrent de toutes parts. La Campine est aujourd'hui transformée.

Dans un ouvrage publié en 1856 et intitulé *Traité pratique de l'irrigation des prairies*, M. Keelhoff, ingénieur chargé du service des irrigations de la Campine, a donné sur cette matière des renseignements très-complets et très-intéressants. Nous signalerons ici les points principaux de son ouvrage.

M. Keelhoff divise les travaux proprement dits de l'irrigation en travaux préparatoires et travaux intérieurs.

Les travaux préparatoires comprennent les rigoles d'alimentation principales et secondaires, celles de colature et d'écoulement, les ouvrages complémentaires, tels que prises d'eau, barrages, chutes, etc.

Les travaux intérieurs comprennent le système de distribution et d'écoulement des eaux dans les parcelles cultivées.

Travaux préparatoires. — 1° *Rigoles d'alimentation.* — Ces rigoles prennent l'eau dans le canal principal pour la répartir sur toute une zone de prairies.

Les rigoles principales sont dirigées suivant la pente générale du terrain, et les rigoles secondaires qui s'en détachent suivent les parties culminantes du terrain ; s'il s'agit d'une surface plane, les rigoles secondaires sont perpendiculaires aux rigoles principales.

Les rigoles principales ont une section décroissante à partir de la prise d'eau ; pour les rigoles secondaires, où la question d'économie est peu sensible, on adopte des sections constantes sur toute la longueur.

Le plan d'eau dans les rigoles doit être au-dessus du terrain à arroser, ce qui conduit quelquefois à les établir en remblai, chose à éviter autant que possible ; cependant, il vaut mieux recourir à des remblais que de ne pas assurer l'arrosage de la surface entière.

Lorsque le plan d'eau des rigoles est à $0^m,25$ ou $0^m,30$ au-dessus du sol à arroser, c'est une hauteur suffisante.

La pente des rigoles doit être assez forte pour que l'eau conserve les troubles qu'elle tenait en suspension, sans cependant attaquer les berges ; il faut à ce sujet prendre comme bases du projet les pentes des cours d'eau de la contrée.

Dans les terrains sablonneux de la Campine, M. Keelhoff a donné aux rigoles des pentes variant de $0^m,0003$ à $0^m,0015$, et l'expérience a montré que c'était là des limites convenables.

Pour les rigoles secondaires, il faut une hauteur d'eau de $0^m,50$ au moins afin d'assurer l'alimentation des rigoles de distribution, et, quand la surface à alimenter dépasse 50 hectares, la hauteur de l'eau doit atteindre $0^m,75$.

La section des rigoles est calculée par les formules ordinaires que nous avons précédemment exposées.

Dans la Campine, les talus à 1 1/2 et même à 2 de base pour 1 de hauteur n'ont pu tenir par eux mêmes ; il a fallu les revêtir d'un gazonnement à plat. Il convient donc de prévoir des talus à 1 1/2 avec gazonnement.

Les digues des rigoles en déblai n'ont pu résister aux infiltrations qu'en leur donnant une largeur de 1 mètre en couronne. La figure 5 planche XV représente le profil d'une rigole.

En ce qui touche le profil en long des rigoles principales, il est bon que leur ligne d'eau à l'origine soit au-dessous du seuil du barrage de prise d'eau, afin qu'on puisse exécuter facilement des jaugeages. De plus, comme le couronnement des digues des rigoles reste dans un plan horizontal, on doit établir des chutes toutes les fois que la hauteur du remblai devient trop considérable.

2° *Rigoles de colature et d'écoulement.* — On donne le nom de rigoles de colature ou de colateurs aux rigoles qui recueillent l'eau ayant servi à une première irrigation, et la conduisent en un point où cette eau sert à une seconde irrigation. M. Keelhoff conserve le nom de rigoles d'écoulement à celles qui recueillent les eaux devenues inutiles pour les conduire au canal principal d'écoulement.

Avec les colateurs, on arrive en Italie à ne pas laisser perdre une seule goutte

d'eau ; les eaux ainsi reprises ne produisent plus guère qu'un effet d'arrosage, effet précieux sans doute, mais elles sont en grande partie dépouillées de leurs principes fertilisants.

La section d'un colateur doit être suffisante pour recevoir toutes les eaux d'irrigation ainsi que les eaux de pluie ; en Campine, on adopte pour les canaux d'écoulement une section égale à celle des canaux d'irrigation correspondants augmentée d'un cinquième.

Le plan d'eau des colateurs doit toujours être à quelques centimètres en contre-bas du plafond des rigoles qui y débouchent. Un assainissement parfait est, en effet, le corollaire obligé d'une bonne irrigation.

D'après ce principe, il faut donner aux colateurs la plus grande pente possible, sans cependant atteindre la limite où les talus seraient attaqués.

Travaux intérieurs. — Les travaux intérieurs ont pour but de préparer la surface du sol de telle sorte que l'eau puisse y être uniformément répartie, et puisse, en outre, s'écouler rapidement dès qu'elle a produit son effet.

Divers systèmes sont employés pour atteindre ce but ; on a le plus souvent recours soit à l'irrigation par ados, soit à l'irrigation par submersion ; mais, lorsque le terrain présente des pentes prononcées, on établit une irrigation par rigoles de niveau, ou une irrigation en épi de blé, ou encore une irrigation par demi-planches superposées.

1° *Irrigation par ados.* — Un terrain divisé par ados est celui dont la surface se compose d'une série de toits à deux versants ; sur les faîtes se trouvent les rigoles d'irrigation A ; dans les noues ou thalwegs, se trouvent les colateurs B, figure 6, planche XV.

Transversalement aux ados et à leur partie haute, on rencontre une rigole secondaire qui donne l'eau à toutes les rigoles alimentaires qui viennent la rencontrer normalement.

Les ados sont perpendiculaires à la rigole de distribution, c'est-à-dire dirigés suivant les horizontales du terrain ; par ce moyen, le versant d'amont d'un ados est un peu en déblai, et celui d'aval un peu en remblai ; les terrassements sont réduits au minimum.

Dans la Campine, la longueur d'ados la plus convenable est de 30 mètres ; avec une longueur moindre, on a un trop grand développement de rigoles ; avec une longueur plus grande, l'arrosage uniforme devient presque impossible.

En ce qui touche la pente transversale des ados, elle peut être faible si le sol est imperméable, parce qu'alors il n'y a pas de perte par infiltration ; sur un sol perméable, il faut des pentes considérables pour atténuer les infiltrations.

Dans les terrains sablonneux très-perméables de la Campine, on a adopté des pentes transversales de $0^{m},05$ par mètre.

La largeur des ados varie comme la pente transversale, parce que l'importance des terrassements est intimement liée à la valeur de cette pente. Sur un sol peu perméable, chaque versant de l'ados pourrait, à la rigueur, atteindre 15 mètres ; sur le sol sablonneux de la Campine, on s'est borné à la largeur de 5 mètres.

La surface des ados doit être entretenue avec le plus grand soin, si l'on veut obtenir un arrosage uniforme ; c'est une précaution trop souvent négligée.

Les rigoles de déversement A sont horizontales et leur profondeur n'est que de $0^{m},05$; avec des rigoles plus profondes, on aurait, dans des terrains perméables, des pertes d'eau trop considérables. La largeur est de $0^{m},25$.

Les rigoles d'égouttement établies comme l'indique le profil en travers de la figure 6, planche XV, permettent un assainissement complet.

La création d'un hectare de prairie irrigable par la méthode des ados nécessite la dépense suivante :

	Francs.
Tracé des travaux et placement des gazons pour en dessiner le profil.	10,00
Défoncement du sol à 0m,60 de profondeur.	150,00
Terrassements.	60,00
Règlement des ados, des talus, des chemins d'exploitation..	50,00
Engrais.	350,00
Mise à niveau des rigoles de déversement et toilette des travaux après l'hiver,.	50.00
Achat des graminées.	75,00
Frais d'ensemencement et d'enfouissement des graines avec le râteau de bois.	9,50
Plantation d'aunes sur les digues pour abriter les herbes des vents du Nord et du N. E..	7,00
Buses en bois.	15,75
Brouettes et planches de roulage..	5,00
Journées d'ouvriers pour maintenir l'eau dans les rigoles de déversement pendant la sécheresse.	8,50
Total.	768,75
Travaux préparatoires à l'irrigation. . . .	125,00
Prix d'acquisition du sol à l'état de bruyères.	150,00
Prix de revient total d'un hectare de prairie. .	1043,75

Il y a dans la Campine des prairies qui reçoivent des fumures fréquentes ; ce sont celles qui consomment le moins d'eau ; l'irrigation n'est pour elles qu'un arrosage, et ne leur fournit que l'humidité avec peu d'engrais.

Il en est d'autres qui ne reçoivent pas de fumure : ainsi, le Dommel, qui possède un débit moyen de 1,000 litres à la seconde, passe sur une prairie de 5 hectares seulement ; c'est une consommation de 200 litres à l'hectare et à la seconde ; ces prairies donnent chaque année une récolte de foin de 12,000 kilogrammes et une récolte de regain de 4,000 kilogrammes. Les éléments nécessaires à cette production sont évidemment fournis par la grande quantité d'eau employée à l'irrigation.

Dans le Midi, on pourrait, avec le même cube, arroser 1,000 hectares au lieu de 5.

Il y a dans la Campine trois époques d'arrosage :

A l'automne, après la coupe du regain, du 15 septembre jusqu'aux gelées ;

A la sortie de l'hiver, de mars à la fin de mai ;

Après la fenaison, jusqu'au 15 août.

C'est l'arrosage d'automne qui est le plus important, et c'est à cette époque que les eaux paraissent le plus riches.

La durée des arrosages dépend de la perméabilité du terrain ; un arrosage continué pendant longtemps peut être sans inconvénient sur un sol perméable ; il risquerait de produire un mauvais effet sur la végétation, dans un terrain imperméable.

On suspend l'arrosage huit jours avant la coupe des prairies, et on a soin de ne pas arroser avec des eaux troubles des herbes déjà hautes. Les

herbes vasées ne donnent, en effet, qu'un foin poudreux que les bestiaux refusent.

Les prairies irriguées doivent être l'objet d'un entretien assidu; il faut maintenir sans cesse la forme géométrique qui leur a été donnée tout d'abord.

Lors du curage et du nettoyage des rigoles, il faut éviter de les approfondir, parce qu'on enlèverait le dépôt vaseux abandonné par l'eau, et ce dépôt donne de l'imperméabilité aux rigoles et diminue les pertes par infiltration.

Dans un sol imperméable, cette précaution ne serait pas nécessaire.

2° *Irrigation par submersion.* — L'irrigation par submersion consiste à diviser le sol en bassins entourés de bourrelets en terre et à faire séjourner dans ces bassins, pendant plus ou moins de temps, une nappe d'eau plus ou moins épaisse.

Dans la Campine, les bassins ont 55 mètres de long et sont traversés en leur milieu, dans le sens de la longueur, par une rigole qui sert à amener les eaux, puis à les emmener.

Cette rigole a une pente de $0^m,0005$ à $0^m,001$, avec une profondeur de $0^m,35$ et une largeur de $0^m,50$.

Les deux versants sont inclinés vers elle avec une pente de $0^m,005$.

De la sorte, l'égouttement est assuré et il ne reste pas d'eau stagnante sur la prairie. Il va sans dire que le plafond de la rigole d'égouttement, à son extrémité d'aval, doit se trouver au-dessus du plan d'eau du fossé dans lequel elle débouche.

La largeur d'un bassin est de 50 mètres.

On le recouvre d'une nappe d'eau dont l'épaisseur est de $0^m,02$ à $0^m,04$ près des bourrelets latéraux; près de la rigole centrale, cette épaisseur s'élève à $0^m,15$, à cause de la pente transversale.

Il va sans dire que le bassin est horizontal dans le sens de sa longueur.

Ce système ne peut donc s'appliquer qu'à un terrain plat, sans quoi les terrassements deviendraient trop considérables.

La pratique de l'irrigation est très-simple : on lève complétement la vanne alimentaire, et on remplit le bassin; puis on baisse la vanne de manière qu'elle ne donne plus qu'un léger volume d'eau, suffisant pour entretenir la nappe d'eau à son niveau primitif.

La dépense d'eau, dans ce système, est, d'après M. Keelhoff, quinze fois moins forte que dans l'irrigation par ados et par déversement; dans ce dernier cas, en effet, l'eau coule toujours et subit de nombreuses pertes; dans le second cas, au contraire, l'eau reste stagnante, et lorsque la terre est une fois mouillée, les pertes se réduisent à celles de l'évaporation.

Employant beaucoup moins d'eau, et une eau stagnante dans laquelle les gaz en dissolution ne se renouvellent pas, l'irrigation par submersion doit être beaucoup moins fertilisante que l'irrigation par ados; aussi exige-t-elle une fumure, là où l'irrigation par ados permet de s'en passer.

En hiver, on peut laisser séjourner l'eau dans les bassins pendant quinze jours ou un mois; lorsque la végétation est dans sa période active, un tel séjour ferait pourrir les herbes; il faut procéder par submersion de 24 heures au plus.

Les prairies irriguées par submersion ont l'avantage de se prêter au parcours des bestiaux, tandis qu'on ne peut les laisser circuler dans les prairies disposées par ados.

3° *Irrigation par rigoles de niveau.* — Ce système s'applique aux terrains dont la pente dépasse $0^m,025$.

On établit des rigoles suivant les courbes horizontales ou courbes de niveau; ces rigoles déversent l'eau par leur bord d'aval sur la planche au-dessus de laquelle elles se trouvent; l'eau qui a arrosé une première planche est recueillie par la rigole d'aval et concourt à un nouvel arrosage, et ainsi de suite.

Pour assurer l'assainissement, on établit des rigoles de colature perpendiculaires aux rigoles de niveau dans lesquelles elles débouchent.

Le plan et la coupe en travers, figures 7 et 8, planche XV, font comprendre cette disposition.

Un barrage est établi sur le cours d'eau et fait refluer les eaux dans le canal d'alimentation qui occupe la courbe de niveau la plus élevée, et qui communique par des vannes avec toutes les rigoles de niveau.

Celles-ci suivent toutes les ondulations du terrain, et par suite leur écartement est variable.

Cet écartement doit être d'autant moindre que le terrain est plus perméable, afin d'éviter que l'eau ne soit absorbée totalement avant d'arriver à la rigole inférieure.

L'écartement doit diminuer aussi quand la pente augmente; car, à mesure que l'eau chemine sur une forte pente, elle se réunit en filets dont la grosseur s'accroît peu à peu, et l'arrosage cesse d'être uniforme.

Dans les sols perméables, l'écartement ne doit pas dépasser 15 mètres.

On voit sur la coupe en travers que les rigoles de niveau sont en plan incliné à l'amont et en saillie à l'aval; cette saillie, qui doit donner un déversement régulier, s'établit avec des mottes de gazon bien dressées horizontalement.

Ces rigoles ont $0^m,15$ de profondeur au milieu de la distance qui sépare deux colateurs; à la rencontre des colateurs la profondeur atteint $0^m,30$. De la sorte, on peut produire à volonté un assainissement rapide et complet.

Les colateurs communiquent par des vannes avec le canal d'alimentation; ils peuvent alimenter directement telle ou telle rigole, pourvu qu'on les barre avec des gazons, avec une planche, ou avec une feuille de tôle qu'on déplace à volonté, qui est pourvue d'une poignée et qui a la forme de la section de la rigole.

4° *Irrigation par épi de blé.* — L'irrigation par épi de blé ne s'applique qu'à un terrain formé d'une série de contre-forts et de vallées perpendiculaires les unes aux autres, figure 14, planche XIV.

Un canal de dérivation A alimente des rigoles *a a* placées sur des lignes de faite, et communiquant avec d'autres rigoles de déversement *b b*; celles-ci ont une section qui s'amincit jusqu'à se réduire à zéro à leur extrémité. L'eau qu'elles déversent se répand entre elles, et l'excès est recueilli par les rigoles *c c* placées dans les thalwegs, rigoles qui aboutissent à un canal de colature ou d'écoulement.

Ce mode d'irrigation, dit M. Keelhoff, n'est applicable qu'à des terrains d'une pente de $0^m,02$ à $0^m,08$ par mètre; dès que la pente dépasse ce chiffre, l'irrigation se fait d'une manière très-incomplète.

Il est préférable de substituer à ce système celui des rigoles de niveau. Les rigoles *a a* doivent être espacées au plus de 50 mètres; les rigoles *b b* doivent être espacées de 3 mètres au minimum à 15 mètres au maximum. Leur largeur va sans cesse en diminuant, afin que l'on obtienne un déversement régulier.

3° Irrigations des Vosges

Les irrigations des Voges, et particulièrement celles de l'arrondissement de Saint-Dié, ont été décrites en 1866, dans une notice rédigée par M. Guérard, conducteur principal des ponts et chaussées. C'est à cette notice que nous empruntons les renseignements qui vont suivre :

« **Formation et qualités relatives des prairies naturelles.** — Le dépôt alluvial qui constitue le fond des bassins, et sur lequel reposent des prairies naturelles, est formé des débris et de détritus des terrains adjacents supérieurs ; il est d'autant plus fertile que son fond est plus graniteux et que les eaux d'irrigation, toutes choses égales d'ailleurs, sont plus chargées des principes alcalins qu'elles enlèvent aux terrains granitiques à travers lesquels elles se meuvent. Les prairies de première qualité, qui avoisinent les formations cristallines et où les irrigations exercent une influence réelle, occupent, en effet, la partie supérieure du bassin de la Meurthe et quelques vallons du Champ-du-Feu, sur la rive droite de la Bruche; celles de moyenne qualité, les deux rives de la Meurthe au-dessous de Saint-Dié, la plus grande partie des vallées de la Bruche et du Rabadeau; et celles de qualité inférieure, les vallées du Taintroué et de la Plaine, où les irrigations sont pour ainsi dire de nul effet.

Irrigations. — La prairie naturelle s'élève de la nappe alluviale des bassins au flanc des coteaux, et occupe le versant des collines jusqu'aux faîtes de la chaîne et de ses ramifications; elle apparaît partout où il y a une source un peu abondante, des gisements aquifères ou des suintements assez multipliés pour entretenir une humidité permanente dans la couche végétale. De là deux méthodes d'irrigation résultant de la situation des prairies et de leur relief transversal.

Première méthode. — Dans la première méthode, les eaux de source ou celles qui viennent du fond des ravines sont recueillies dans des rigoles qui suivent à peu près horizontalement les sinuosités des coteaux et des vallons, avec des espacements assez faibles pour que l'eau se répande aussi uniformément que possible à la surface du sol et pénètre lentement à l'intérieur. Ces espacements forment des zones à peu près parallèles de 4 à 5 mètres de largeur, qui s'arrosent toutes de la même manière jusqu'au fond des vallons ou des ravines, chaque zone recevant l'eau de la rigole supérieure.

Les métayers détenteurs de domaines dans les régions élevées, et qui n'ont à leur disposition que quelques minces filets d'eau, les réunissent pour établir une fontaine, dont le trop-plein se charge de purin en traversant l'étable et suffit avec les eaux pluviales accumulées et graissées de la même manière pour fertiliser quelques hectares de prairie au bas des établissements.

Deuxième méthode. — La première méthode, qui s'applique à toute prairie dont la pente est supérieure à 10 pour 100, se modifie graduellement en passant des vallons aux vallées un peu plus larges, en ce que les rigoles nourricières s'inclinent d'autant plus sur les rigoles de distribution, que la déclivité longitudinale diminue; elle conduit ainsi à la deuxième méthode, qui constitue la grande irrigation des bassins sensiblement de niveau dans le sens transversal et dont les pentes longitudinales, qui vont en décroissant à partir de 1 pour 100, ne sont cependant pas inférieures à 4 pour 1,000 dans le bassin de Saint-Dié.

Dans cette seconde méthode, où l'art vient plus particulièrement en aide à la nature, les eaux d'irrigation sont détournées des ruisseaux et des rivières par des barrages d'autant moins multipliés que la pente longitudinale diminue et que le cours d'eau prend des proportions plus considérables ; sur la Meurthe, entre Saint-Dié et Raon-l'Étape, ils sont à un kilomètre en moyenne l'un de l'autre. Par une sorte d'entente naturelle entre les riverains d'un cours d'eau, un barrage n'arrose généralement qu'une des rives.

Répartition de l'eau dans les canaux d'arrosage. — L'eau est dérivée dans un grand canal, qu'on appelle canal principal, d'une largeur réglée sur les besoins à desservir, mais qui excède rarement un mètre et demi. Le canal, dont la direction à travers le bassin dépend de sa déclivité longitudinale, est établi de manière à procurer un écoulement rapide aux canaux secondaires qu'il alimente, lesquels deviennent à leur tour des canaux d'alimentation pour une nouvelle répartition des eaux, et ainsi de suite jusqu'aux dernières ramifications, souvent dirigées dans tous les sens et suivant des allures assez tortueuses subordonnées au relief du sol.

Lorsque la pente naturelle ne suffit plus pour produire un écoulement tel que l'eau puisse se répartir régulièrement dans toute l'étendue du sol irrigable, on crée des pentes artificielles en disposant le terrain en sillons ou ados, comme pour la culture des céréales dans les plaines. Ces sillons ou ados sont des bandes rectangulaires de terrain de 40 à 60 mètres de longueur sur 7 à 8 mètres de largeur, formant entre elles deux plans inclinés parfaitement desservis, suivant les pentes qu'on a jugé utile d'établir, en raison du degré de perméabilité du sol, et qui varient de 2 à 5 centimètres. Au sommet de ces deux plans inclinés s'ouvre une rigole de distribution régulièrement dressée au cordeau, suivant une pente de $0^m,002$ à $0^m,005$, et qui va en diminuant de largeur de l'origine à l'extrémité, tandis que les rigoles d'écoulement ou de colature, qui sont au pied, augmentent en sens inverse. On appelle *roye*, dans le pays, les rigoles de distribution; *ressuierosses*, les rigoles d'écoulement, et *mère roye* le canal qui alimente les royes. Les rigoles de distribution ont $0^m,15$ de largeur à leur origine, et $0^m,08$ à leur extrémité, sur $0^m,10$ à $0^m,18$ de profondeur ; celles d'écoulement ont les mêmes dimensions en largeur, mais dans un sens opposé.

Les rigoles de colature communiquent à une rigole de décharge ou canal collecteur, suffisant pour contenir les eaux utilisées à l'irrigation d'une prairie de dix sillons, ayant des dimensions qui varient entre $0^m,15$ et $0^m,30$ de largeur sur $0^m,15$ à $0^m,25$ de profondeur, et qui augmentent au delà de la première série, en raison de la pente et du volume d'eau à débiter. Ces premiers colateurs, en se réunissant donnent naissance à de plus grands, qui débouchent directement à la rivière, ou qui se continuent sur les fonds inférieurs, pour devenir eux-mêmes, en ménageant la pente, de nouveaux canaux d'arrosage. On opère sur ces nouveaux canaux comme sur les précédents ; cette opération se répète souvent un assez grand nombre de fois et embrasse des étendues de plusieurs kilomètres, notamment pour la partie des prairies éloignées des cours d'eau. Aussi, quand les bassins atteignent une certaine largeur, on peut fertiliser les prairies sur plus de moitié de cette largeur par ce système d'irrigation, qu'on appelle irrigation par rechute ou reprise d'eau. Il n'est du reste mis en usage que lorsqu'il n'a pas été possible de faire autrement, car le cultivateur sait fort bien que les eaux perdent de leur propriété fécondante à mesure qu'elles s'éloignent de leur lit naturel et qu'elles ont servi un plus grand nombre de fois. Cependant on reconnaît que ces eaux de reprise produisent assez souvent des résultats

très-satisfaisants, surtout lorsque par un écoulement rapide et en s'accumulant elles ont regagné une partie de leurs propriétés physiques, et qu'elles arrosent des fonds suffisamment perméables. C'est ce qui explique comment nos petits ruisseaux peuvent suffire à l'irrigation de tant de prairies, depuis leur source jusqu'aux cours d'eau dont ils sont tributaires, ou jusqu'au sol qui, par sa nature, profite si peu des irrigations, qu'on cesse de les pratiquer.

Pour mieux faire comprendre le mode d'irrigation par ados, le plus économique comme le plus usité, nous donnons (pl. XXI, fig. 1 et 2) les plans d'une petite prairie de la banlieue de Saint-Dié. Nous avons eu occasion de faire construire pour des irrigations un barrage, qui a coûté 2,500 francs, dans une partie importante du cours de la Meurthe, à 8 kilomètres en aval de Saint-Dié, qui est un des plus grands en ce genre.

En général, les barrages sont simples et coûtent peu de construction; les frais d'entretien n'atteignent pas 50 centimes par hectare, annuellement.

L'eau, introduite à pleins bords dans les rigoles de distribution, est déversée, à gauche et à droite, sur le sol, au moyen de petites saignées dans la berge, ou plus souvent par une série de petits barrages formés par quelques gazons, des cailloux, des bouts de planche, etc., distants l'un de l'autre de 8, 10 ou 15 mètres, selon la pente de la rigole, de manière à assurer un mouillage à peu près uniforme sur tous les points. Quand l'eau a ainsi ruisselé à la surface du sol pendant un certain temps, on la détourne pendant une durée double ou triple de l'arrosage, pour permettre à la couche végétale de se ressuyer complétement; puis on recommence la même opération, et on la continue pendant un mois et demi au printemps, et deux à trois mois à l'automne.

Époques. — Les irrigations ont lieu au retour des pluies d'automne, vers le 15 octobre, et de printemps, vers le 20 mars, lorsque les ruisseaux et rivières coulent presque à pleins bords, et que le débit est au moins double de celui de l'étiage, soit parce que les eaux sont meilleures dans cet état, soit plutôt parce que jusqu'à cette limite elles ne sont pas assez volumineuses pour suffire aux besoins de tous.

Elles cessent aux premières gelées, vers le 15 décembre, et au printemps, dans les premiers jours de mai, dès que la végétation commence à se développer. Il importe que les prairies soient convenablement ressuyées avant les fortes gelées. Si la gelée survient au moment de l'irrigation, on continue l'arrosage autant que possible jusqu'au dégel, pour empêcher la gelée de pénétrer jusqu'au racines des plantes car le gazon devient jaune au printemps, et la récolte est fort réduite lorsque cet accident se produit.

Quantité d'eau employée. — La quantité d'eau employée à ces grandes irrigations est très-variable ; elle dépend à la fois de la durée des pluies, du gonflement des ruisseaux et rivières, et de la nature du sous-sol. Sur les sols à fond graniteux d'une nature très-absorbante, elle peut atteindre au moment même de l'arrosement 50 litres en moyenne par seconde et par hectare, descendre à 30 litres sur les fonds moyennement absorbants et se restreindre à 20 litres sur ceux d'une faible perméabilité.

Ces qualités varient, du reste, selon le nombre de périodes d'arrosage qu'il est nécessaire d'adopter ; dans tous les cas elles sont incomparablement supérieures aux volumes d'eau employés dans le Midi. Mais si la quantité d'eau augmente en raison du degré de perméabilité du sol irrigable, la durée de l'irrigation diminue en raison inverse ; de sorte que sur les fonds très-absor-

bants, il y a à peu près égalité entre la durée de l'arrosage et ses temps d'arrêt.

Il y a encore l'irrigation d'été, qui consiste à maintenir un peu d'eau dans les rigoles 8 ou 16 jours après la première récolte, ce n'est plus qu'un simple arrosage destiné à rafraîchir le sol pour l'empêcher d'être brûlé par les fortes chaleurs de juillet et d'août, et pour mieux préparer la récolte des regains.

Emploi de l'eau. — Selon l'usage généralement admis, l'eau une fois introduite dans les canaux mères-royes, appartient au plus habile, et comme elle ne peut, sauf des cas exceptionnels, suffire aux besoins de tous à la fois, les premiers venus sur la prairie se l'approprient, en bouchant ou fermant les rigoles et canaux de leurs voisins, jusqu'à ce que de nouveaux venus viennent, par le même procédé, enlever celle qui est nécessaire à leur usage, et ainsi de suite d'un bord à l'autre de la prairie. C'est une lutte continuelle qui dure la nuit comme le jour et dans laquelle la meilleure part échoit au plus vigilant.

Au moment des grandes pluies, lorsque l'eau est trouble, chargée de limon, qu'elle entraîne dans son cours l'humus descendu des coteaux, que les champs se dégraissent pour graisser les prés, selon l'expression locale, presque tout le monde du village est sur pied et se répand dans la prairie, chacun muni d'un *fossoir*, pour *tourner* l'eau sur son héritage.

Ici le désordre n'est qu'apparent, et il est rare que dans cette prise et reprise de l'eau, les intéressés en arrivent à des voies de fait, chacun sentant que l'eau est au premier occupant, tant qu'il est sur le pré.

Dans les grands centres de population, comme à Saint-Dié, les propriétaires, soit que le temps leur manque, soit qu'ils sentent la tâche au-dessus de leurs forces, se réunissent entre eux jusqu'à ce qu'ils aient formé une agglomération de propriétés arrosées par une seule dérivation et pouvant contenir 20 à 25 hectares, et ils chargent une seule personne, non intéressée, de faire l'irrigation en bon père de famille, comme si toute la prairie lui appartenait.

Cette pratique fondée sur une sorte d'entente mutuelle entre les propriétaires ayant un intérêt collectif, ne se propage pourtant guère et ne trouve pas d'adhérents dans les grands centres. Mais c'est qu'aussi le petit propriétaire aime à soigner lui-même sa parcelle de pré, et en outre, il faut bien le dire, il se croit plus soigneux, plus vigilant que son voisin, il est persuadé d'avance qu'il pourra avoir l'eau en plus grande abondance dans les meilleurs moments; il jouit du fruit de son labeur, et puis le grand mobile pour le cultivateur généralement peu aisé dans nos montagnes, c'est qu'il n'a pas d'argent à débourser, tout en restant convaincu que sa besogne est mieux faite.

Rendement des prairies. — Le rendement des prairies dépend essentiellement de la nature du sol et des eaux d'irrigation, le fourrage qu'on récolte sur les fonds graniteux bien irrigués est très-supérieur en qualité à celui qui provient des terres argilo-siliceuses, et le produit par hectare est plus que double.

Le produit moyen par hectare des meilleurs prés est de 5,500 kilog. de foin pour la première coupe, de 2,500 kilog. de regain pour la deuxième coupe, et quelquefois la troisième coupe; il se réduit pour les autres prés à 2,500 kilog. de foin pour la première coupe et 1,000 kilog. de regain pour la deuxième coupe. Ce dernier produit est même fort souvent abandonné pour les frais de la première récolte qui s'élèvent de 30 à 35 fr. l'hectare.

Valeur vénale et entretien. — La valeur vénale de la propriété en nature de prairie est à peu près en rapport avec le rendement; elle n'est pas inférieure à 10,000 fr. l'hectare pour les prés de qualité supérieure, et tombe à 4,000 fr. et

même à 3000 fr. l'hectare pour les prés de qualité ordinaire, à sous-sol argileux, qui forment la classe la plus nombreuse, celle qui exige en outre une plus grande dépense d'entretien ; car elle se rapporte à un état du sol où il devient nécessaire d'assurer l'écoulement de l'eau par des pentes artificielles, de construire des barrages plus importants et surtout des canaux plus nombreux et plus larges qui permettent d'étendre la surface d'arrosage en portant l'eau à de plus grandes distances. Dans certaines vallées telles que celles du Taintroué, de la Valdange, de la Ravine, de la Plaine, on est souvent obligé de soumettre des portions de prairie infestées de mousse et de jonc à une culture ordinaire pour les remettre ensuite en prairie, c'est ce qu'on appelle rompre un pré, et il suffit pour cela d'en retourner le gazon et de lui donner deux ou trois cultures pour en ameublir la surface, après quoi on le remet en pré en y répandant de la semence de foin; d'autres fois ce sont les sillons qui nécessitent des modifications dans les pentes et dans les dimensions, et dans ce cas c'est ce qu'on appelle refaire le nivellement du pré.

Cette opération, qui se fait en automne ou après la récolte des foins, est assez ingénieuse. Le gazon est coupé par tranches rectangulaires de $0^m,20$ à $0^m,35$ de côté sur $0^m,08$ et $0^m,12$ d'épaisseur. Un manœuvre, avec une hache de pré, et à l'aide d'un cordeau, divise la surface de pré en tranches pareilles aux cases d'un damier; un autre détache ces tranches avec un large fossoir, en donnant un coup au-dessous pour séparer la racine du sous-sol, et les superpose en piles de 1 mètre de hauteur, sur deux ou trois rangées contiguës, dans le terrain voisin : puis le nivellement refait et les surfaces des nouveaux sillons dressées, on y répand du fumier très-menu et dans un état moyen de fermentation, et l'on replace les tranches exactement comme on les a enlevées en les damant légèrement. En cas de sécheresse prolongée, on humecte un peu le gazon par un filet d'eau introduit dans chaque rigole du sommet des sillons. Le pré ainsi refait résiste parfaitement aux inondations que l'on prévient, du reste, si on a à les craindre sur quelques points, en enfonçant au milieu de chaque tranche, pour la fixer au sol, une cheville en bois de $0^m,20$.

Le remaniement d'une prairie, qui donne pendant plusieurs années de fort belles récoltes, coûte de 250 à 300 fr. l'hectare sans engrais, et de 400 à 500 fr. avec engrais. Il ne se fait qu'à des intervalles très-éloignés, et seulement dans les lambeaux de diluvium sableux, peu fertiles de leur nature, notamment dans les bassins de la Plaine et de la Fave ; quoique profitable partout, on le pratique beaucoup moins sur les fonds graveleux.

A ces dépenses assez rares, viennent s'ajouter annuellement les frais relatifs à l'irrigation, au curage de canaux et rigoles et à l'entretien des barrages. A Saint-Dié, lorsque ces travaux s'exécutent par voie d'entreprise, on paye 15 fr. par hectare et par an pour l'irrigation complète et pour l'*arrosage*, c'est-à-dire, pour le curage de tous les canaux et rigoles d'arrosage. On a soin en même temps de rétablir les rigoles du sommet des sillons lorsqu'elles sont déformées, qu'elles ont des dimensions trop grandes par place, ou bien qu'elles sont percées de trous de taupe.

Les frais d'entretien et de reconstruction des barrages varient en raison de l'importance du cours d'eau, ils peuvent s'élever de 5 à 10 francs par hectare chaque année sur les petits ruisseaux, et atteindre 40 francs sur les rivières.

Desséchement. — Les eaux d'irrigation ne produisent tout leur effet utile qu'à la condition de ne séjourner qu'un instant à la surface du sol, de s'écouler en-

suite, soit dans le sous-sol, soit dans leurs canaux naturels ou artificiels, et enfin d'être souvent renouvelées.

L'eau stagnante pourrit les plantes par sa fermentation dans le sous-sol, elle engendre, surtout dans les sous-sols argilo-siliceux, des matières visqueuses et roussâtres qui sont de véritables poisons pour les plantes; d'ailleurs, l'eau stagnante entretient le froid dans l'intérieur du sol, et nos prairies froides de la Valdange, du Taintroué, de la Ravine et de la Plaine, sont celles où l'eau séjourne sur la surface ou à l'intérieur du sol. De tout temps le cultivateur intelligent a cherché à soutirer du sous-sol les eaux nuisibles à la couche végétale. Le procédé le plus généralement suivi consiste à augmenter l'inclinaison normale des sillons et la profondeur des rigoles de colature; et quand celles-ci ne peuvent être descendues assez bas pour assurer un asséchement satisfaisant on y supplée par des conduits souterrains ou des pierrées, s'il y a des matériaux à proximité; dans le cas contraire, on remplit le fond de la tranchée avec des branchages de toute sorte, de petits fagots recouverts de mousse, ou bien c'est une conduite en bois de forme triangulaire, fabriquée avec des roseaux ou planches de rebut, que l'on met à la place. Mais tous ces moyens d'assainissement sont très-peu répandus; les cultivateurs qui s'en sont occupés ont trouvé peu d'émules jusqu'alors, soit que plus ou moins bien exécutés ils n'aient pas produit des résultats assez efficaces, soit manque de confiance dans ces résultats.

Le drainage régulier, avec tuyaux de terre cuite, qui inspirait une assez grande confiance au début, semble être lui-même tombé en oubli; car il est à peine question maintenant des 25 hectares drainés depuis 1849 par les soins de l'administration et de la moitié environ en sus drainée sans son intervention. Il est vrai que la cause de cette défaveur tient principalement à ce que la plupart n'ontpas réussi par suite d'engorgement produit dans l'intérieur des tuyaux par un chevelu de racines, qu'on appelle vulgairement queue de renard, et qui consiste en une longue traînée de filaments végétaux très-ténus, s'enroulant quelquefois en pelote et bouchant complétement la section des tuyaux. Ces filaments radiculaires existent-ils naturellement à une certaine profondeur dans certains sous-sols; ou bien n'a-t-on pas pris assez de précautions dans l'établissement des drains, et a-t-on recouvert immédiatement les tuyaux de terre végétale, ou de terres contenant des semences, ce qui produirait le même résultat?

Cette dernière supposition, qui n'exclut pas la première dans certains cas, nous paraît d'autant plus vraisemblable qu'en 1856 nous avons fait exécuter dans la banlieue de Saint-Dié deux petits drainages qui se sont parfaitement conservés et fonctionnent comme au premier jour, tandis que d'autres, établis dans des conditions de sol analogues, se sont obstrués sur un grand nombre de points. Nous devons peut-être ce résultat à une circonstance exceptionnelle, en ce que les travaux ayant été exécutés pendant un hiver pluvieux, les terres du sous-sol, pour ainsi dire composées d'argile pure et rejetées sur les tuyaux, ont été comme corroyées par le piétinement des ouvriers, et ont formé une sorte de gangue impénétrable à toute végétation. Quoi qu'il en soit, nous avons pensé qu'il n'était pas inutile de mentionner ici ce fait d'observation, ne fût-ce qu'à titre de renseignement sur la question.

En général, les prairies qui reposent sur les alluvions anciennes, et dont nous avons indiqué précédemment la situation, réclament peu d'assainissement par voie souterraine, parce qu'elles jouissent d'une perméabilité suffisante pour aider à l'accroissement de leur fertilité.

Mais il n'en est pas de même des prairies situées à flanc de coteau, au fond

des vallons et des vallées, dans les terrains secondaires où les eaux exercent une influence manifestement nuisible sur la végétation. Ces eaux, qui viennent des régions élevées et en grande abondance, affluent en nappes ou jets, suivant que les couches aquifères arrivent par une pente continue jusqu'à la surface du sol, ou bien suivant qu'elles sont trop inclinées ou arrêtées par quelque gisement imperméable. Dans le premier cas, elles sortent en suintements sur une certaine étendue, et dans le second cas, elles s'accumulent jusqu'à ce que, subissant l'effet de la pression supérieure, elles s'échappent par une issue latérale on jaillissent de bas en haut.

Il suffit donc de rechercher ces nappes ou jets pour en combattre l'influence pernicieuse, ou pour en assurer l'écoulement au profit de l'irrigation des prairies inférieures; et souvent avec un drain de ceinture établi à la limite supérieure de la zone humide, ou suivant la ligne aquifère, quelques drains dirigés suivant les plis concaves de la surface, et, s'il y a lieu, de petits branchements communiquant aux points d'émergence des jets, on parvient à assainir suffisamment une prairie d'une assez grande étendue.

Cette manière de procéder, qui nous paraît la plus rationnelle, est d'une très-grande importance pour la bonification des prairies immergées par les eaux souterraines, et c'est le plus grand nombre, en ce qu'elle prévient leur congélation, lorsque à la suite d'un dégel arrive subitement une gelée intense, parce qu'alors les eaux de filtration qui découlent des fonds supérieurs ne peuvent plus produire d'effet nuisible sur la couche végétale.

M. Viard, conducteur, a dirigé avec beaucoup de succès, tant sous les ordres de M. l'ingénieur Kuss que sous les nôtres, diverses opérations de cette nature dans la vallée de la Bruche, une entre autres immédiatement au-dessous de Schirmeck, sur la gauche de la rivière, et dans laquelle il est parvenu à réunir en association soixante propriétaires, possédant indivisément 18 hectares de prés, terres cultivées et jardins, entre la route et le pied du coteau. Cette étendue de terrain, au moment des grandes pluies, se trouvait complétement envahie par les eaux souterraines descendant de la côte des Chênes et de la côte de la Vigne. Ces eaux, pour ainsi dire emprisonnées dans le pli rentrant du milieu, se répandaient lentement dans toute la surface et y entretenaient une humidité des plus nuisibles.

Aujourd'hui, les eaux nuisibles sont recueillies dans deux grands collecteurs, qui les versent à la rivière après avoir traversé la route sous deux ponts différents; le drainage ayant été divisé en deux parties, dans chaque partie un drain de ceinture a été établi suivant la ligne aquifère, à la limite du terrain meuble et du sol alluvial, un autre au centre du pli rentrant et formant collecteur, partie à ciel ouvert et partie avec conduit en pierre de $0^m,20$ à $0^m,25$ de section, puis quelques branchements soutirant les eaux de source et les déversant dans les collecteurs.

La dépense qu'a nécessitée ce travail ne s'est pas élevée au delà de 50 fr. l'hectare, et les propriétés assainies par ce moyen ont doublé de valeur et de produit. »

II

ARROSAGES SIMPLES

OU IRRIGATIONS A FAIBLE CONSOMMATION D'EAU

PRATIQUÉES DANS LES CLIMATS DU MIDI

1° Irrigations du département de Vaucluse. Canal de Carpentras

La partie du département de Vaucluse située au nord de la Durance est abondamment pourvue de canaux d'irrigation. Les deux sources principales d'alimentation sont la Durance pour les eaux troubles et la fontaine de Vaucluse pour les eaux claires.

La planche XX représente la région qui nous occupe ; elle est extraite d'une notice rédigée en 1850 par M. Conte, ingénieur des ponts et chaussées.

Canaux d'arrosage à l'eau claire. — C'est la fontaine de Vaucluse qui alimente les canaux d'arrosage à l'eau claire.

Nous avons vu, en traitant de l'hydrologie, que la fontaine de Vaucluse est l'exutoire d'un vaste bassin perméable de calcaire néocomien de 70 kilomètres de longueur, qui s'étend jusqu'à Sisteron, sur une superficie de 96 500 hectares : c'est un plateau élevé sur lequel il tombe environ $0^m,80$ de pluie par an, ce qui représente pour la superficie totale un débit de 24 mètres cubes à la seconde.

La fontaine de Vaucluse donne un débit de 10 à 12 mètres cubes à la seconde, c'est-à-dire environ la moitié du cube de l'eau de pluie que recueille le bassin.

Ce débit ne tarde pas à se diviser en deux branches, la branche de l'Isle et la branche de Velleron ; c'est à partir de cette division que les diverses branches formées successivement par le cours d'eau prennent le nom de Sorgues.

Sur la branche de l'Isle on ne tarde pas à rencontrer le barrage du Prévôt qui alimente le canal de Vaucluse en détournant la majeure partie des eaux. Le canal de Vaucluse arrose diverses communes jusqu'au château d'Aiguille où il se divise en deux branches, dont l'une se rend à Sorgues et l'autre à Avignon.

Le canal de Vaucluse est la propriété de l'État ; il est administré par un syndicat ; il alimente 114 usines importantes.

La branche de Velleron présente de nombreuses dérivations ; elle arrose neuf communes et finit par se jeter dans l'Ouvèze à Bédarrides.

La fontaine de Vaucluse, avec son débit de 12 mètres cubes, pourrait arroser 12 000 hectares ; mais les chutes et les usines empêchent le développement des irrigations ; aussi ne comprennent-elles que 3586 hectares, dont 24 reçoivent l'eau par des roues hydrauliques.

Le prix des arrosages pour le canal de Vaucluse est de 3 fr. 50 par hectare, et ce prix peut être considéré comme une moyenne.

Canaux d'arrosage à l'eau trouble. — Ce sont des dérivations de la Durance qui alimentent les canaux de dérivation à l'eau trouble.

Il y a cinq de ces dérivations :

1° Le canal de Cabedan-Neuf et de plan oriental.
2° Le canal Saint-Julien.
3° Le canal Crillon.
4° Le canal de la Durançole et des hospices d'Avignon.
5° Le canal de M. de Cambis.

1° Le canal de Cabedan-Neuf fut concédé en 1738. La commune de Cavaillon fut appelée à faire les avances de la dépense aux conditions ci-après :

« Les sommes nécessaires à la construction du canal seront versées par la commune entre les mains d'un trésorier d'honneur qui sera nommé par le corps des intéressés.

Il sera dressé, par des experts nommés par le bureau des eaux de Cavaillon, une *liève* des terrains reconnus arrosables, et la commune retirera la cotisation annuelle qui sera perçue sur ces terrains, pour s'assurer du remboursement des sommes avancées par elle.

Le remboursement des sommes empruntées sera fait en seize années. »

Les intéressés étaient tenus de fournir les terrains nécessaires à l'établissement du canal et des fossés de distribution des eaux.

Ils étaient, en outre, astreints, à perpétuité, à se fournir passage pour les eaux du canal, moyennant indemnité réglée à dire d'experts.

Le canal du Haut-Cabedan fut construit en conséquence entre la Durance et le torrent de Coulon dans lequel il déversait ses eaux inutilisées.

L'association de la rive droite du torrent du Coulon fut constituée en 1824 sous le nom d'Association du Canal de Plan Oriental, et en 1834 la prise d'eau en Durance du canal de Cabedan-Neuf fut construite dans les digues en pierre de la commune de Mérindol.

Les pentes du canal de Cabedan-Neuf varient de $0^m,00025$ à $0^m,001$; on a eu le tort d'y ménager des chutes, qui tiennent les eaux à un niveau inférieur de 10 mètres à celui qu'elles auraient pu atteindre.

La portée du canal de Cabedan-Neuf est de 2 mètres cubes ; il arrose en tout 1196 hectares repartis entre 1150 intéressés.

Pour la section de Cabedan-Neuf, la redevance annuelle à l'hectare, pour les terrains engagés dans l'association, est de 14 fr. 35 pour ceux qui n'ont pas arrosé, et de 24 fr. 79 pour ceux qui ont arrosé.

Ces prix sont de 28 fr. 52 et 39 fr. 50 sur la section de Plan-Oriental.

2° Le canal de Saint-Julien remonte à 1171 ; il résulte d'une concession faite par Raymond V, comte de Toulouse et de Provence, à l'évêque de Cavaillon qui établit avec ce canal un moulin à farine à la porte de Cavaillon.

En 1235, l'évêque accorda aux habitants le droit de se servir du canal pour arroser leurs terres.

La prise du canal Saint-Julien, établie sur la commune du Cheval Blanc, est une simple tranchée pratiquée dans la berge de la Durance. On repurge l'entrée du canal toutes les fois que les graviers l'ont encombrée, et on prolonge la tranchée à travers les grèves toutes les fois que les eaux abandonnent l'entrée du canal.

Après Cavaillon, le canal de Saint-Julien traverse le torrent du Coulon au moyen d'une bâche en bois suspendue par des tiges en fer à un arc en pierres, planche XX.

Le canal de Saint-Julien, d'une longueur de 28 700 mètres, a des pentes variant de $0^m,0003$ à $0,^m001$; il arrose annuellement 1900 hectares de terre ; il prend habituellement 4 mètres cubes d'eau en été à la Durance.

Le nombre des intéressés est de 2060.

Le prix annuel de revient de l'arrosage est de 10 à 12 fr. par hectare.

3° Le canal Crillon, construit en 1785 par le duc de Crillon, a une prise d'eau très-bien située, à l'amont du pont de Bompas, avec un seuil placé à $0^m,81$ au-dessous de l'étiage. Mais le canal est très-mal placé; au lieu de suivre les coteaux, il est en remblai dans la plaine, ce qui fait perdre une grande superficie arrosable.

Les pentes varient de $0^m,0002$ à $0^m,0008$.

Le prix d'arrosage est de 23 fr. 44 par hectare.

4° Le canal de la Durançole a, en basses eaux, une portée de $1^m,60$; il arrose 1120 hectares appartenant à 530 intéressés.

5° Le canal de M. de Cambis, construit par le propriétaire de ce nom et lui appartenant, a une portée de $1^m,50$, et pourrait arroser 1500 hectares. En 1850, il n'arrosait que 27 hectares.

Détails sur les irrigations. — Lorsque l'on a de l'eau en abondance, toutes les cultures s'arrosent.

Prairies. — Les prairies naturelles s'établissent sur de mauvais terrains formés d'un mélange de gravier et de cailloux; ces terrains s'appellent les garrigues. Dans ces terrains, où la préparation première de la terre ne peut être faite à la charrue, le prix de revient d'un hectare de prairie, en comptant 160 kilogrammes de graine à 0 fr. 50, revient à 950 fr.

C'est seulement au bout de 15 ans que la prairie est vraiment formée et qu'elle donne par an trois bonnes coupes.

Pour établir une prairie, dit M. Conte, on ameublit la terre, on la nivelle et on la divise en compartiments, au moyen de bourrelets de 20 centimètres de hauteur environ, perpendiculaires au fossé d'arrosage ; l'espacement des bourrelets est très-variable, suivant l'inclinaison du terrain. Dans les terrains plats, il est de 15 à 20 mètres; on le réduit à 5 mètres, quelquefois même à 2 lorsque l'inclinaison du terrain va à 3 ou 4 centimètres par mètre. On déverse l'eau du fossé dans chacun des bassins formés par les bourrelets, et on les inonde jusqu'à ce que chaque point ait été atteint par les eaux.

Une prairie arrosée à l'eau trouble rapporte facilement 400 fr. nets par hectare ; arrosée à l'eau claire, elle rapporte 100 à 120 fr.

Aussi, partout où on a pu substituer les eaux de la Durance aux eaux de la Sorgue, on s'est empressé de le faire, bien que la taxe d'arrosage de la Durance soit de dix à douze fois plus considérable que celle de la Sorgue.

Pour avoir avec l'arrosage à l'eau claire des produits analogues, il faut employer une quantité de fumier beaucoup plus considérable ; l'eau trouble porte avec elle ses engrais ; l'eau claire, si elle est trop chargée de calcaire, peut même nuire à la végétation.

Luzernes. — Une luzerne irriguée dure trois ans ; la terre est disposée par planches à bourrelets, comme nous venons de l'indiquer pour les prairies naturelles.

La terre, préparée pour la luzerne, reçoit 100 mètres cubes de fumier à l'hec-

tare : elle donne cinq coupes annuelles, pesant en tout 14550 kilogrammes.

A Cavaillon, les luzernes sont arrosées tous les sept jours. La lame d'eau est de $0^{m},06$, ce qui fait 1 litre par seconde et par hectare de débit continu.

A Avignon, on met sur les luzernes tous les dix à douze jours une lame d'eau de $0^{m}08$, ce qui fait $0^{lit},9$ par seconde et par hectare.

Dans d'autres communes, on met après chaque coupe, c'est-à-dire cinq fois dans la saison, une lame d'eau de $0^{m},10$, ce qui ne fait qu'un débit de 1 demi-litre à la seconde et à l'hectare.

Culture maraîchère. — La culture maraîchère et les jardins exigent un débit continu de 2 litres et demi par hectare.

Garance. — La terre étant bien préparée et fumée, on la divise en planches de 1 mètre de largeur, et on sème la garance sur $0^{m},60$ seulement de cette largeur ; au fur et à mesure que la plante pousse, on creuse un fossé entre les planches successives et on recouvre le semis avec la terre qui en provient, afin de transformer en racine l'herbe qui se trouve au-dessus de terre.

La garance ne s'arrose qu'au moment de la récolte et pour ameublir la terre ; on réduit ainsi de plus de moitié la main-d'œuvre de l'arrachage, et un homme qui sur une terre sèche n'arracherait la plante que sur un sillon de 9 mètres de longueur en sa journée peut en arracher 20 mètres sur une terre arrosée.

La quantité d'eau nécessaire pour l'arrosage de la garance représente un débit continu de $0^{lit},4$ à la seconde et à l'hectare.

Cultures diverses. — Dans les années de sécheresse, et lorsque mai et juin se passent sans pluie, il devient nécessaire d'arroser les céréales, les vignes, les tubercules : deux arrosages avec une tranche de $0^{m},12$ suffiront dans la saison, c'est-à-dire dans l'espace de trois mois, et cela correspond à un débit continu de $0^{lit},15$ à la seconde et à l'hectare.

Plus-value des terrains arrosés. — Les terrains arrosables valent en général moitié en sus de ceux qui ne jouissent pas de ce bénéfice.

Les garrigues décuplent de valeur par l'arrosage, ou plutôt par le colmatage qui en quelques années recouvre ce sol infertile d'une épaisseur de $0^{m},30$ $0^{m},35$ de terre végétale.

Canal de Carpentras. — Le canal de Carpentras, dont la direction générale est indiquée sur la carte de la planche XX, est de création moderne. Il date de 20 ans. En voici la description, empruntée aux légendes jointes aux planches du portefeuille de l'École des ponts et chaussées. Les planches 17, 18 et 19 en donnent les principales dispositions.

Historique. — Au commencement du dix-huitième siècle, il n'existait sur la rive droite de la Durance que deux canaux d'irrigation : celui de Saint-Julien, construit dans la commune de Cavaillon par l'évêque de ce siège, et celui de l'Hôpital, construit dans la commune d'Avignon par les chartreux de Bompas. Ces canaux avaient d'abord été construits pour faire marcher des moulins et ils avaient été successivement agrandis pour arroser les terres des habitants des communes. En 1750, un architecte de la contrée, M. Brun, produisit un avant-projet de dérivation des eaux de la Durance qui aurait porté les irrigations dans une grande partie du comtat Venaissin. C'est ce projet qui se trouve aujourd'hui presque entièrement réalisé.

En 1780, les communes de Cavaillon et des Taillades construisirent à leurs frais la première partie de ce canal sous le nom de canal de Cabedan-Neuf. En 1850, les communes de l'Isle, Robion, Lagnes, le Thor et Chateauneuf de Gada-

gnes, entreprirent un autre tronçon du projet primitif. Enfin, en 1854, les communes de Saumanes, l'Isle, Velleron, Pernes, Carpentras, Monteux, Loriol, Aubignan, Beaume, Sarrians et Jonquières, mirent la main à l'œuvre pour compléter ce travail.

Un syndicat provisoire, créé par arrêté du préfet de Vaucluse du 16 octobre 1849, et représentant les communes de l'association de Carpentras, se chargea de toutes les démarches à faire, soit auprès de l'administration, soit auprès des tiers : il ouvrit des listes de souscriptions aux conditions suivantes : le prix de la cotisation fut fixé à 375 francs par hectare, payables en seize termes semestriels, savoir : six pendant l'exécution des travaux et les dix autres termes après leur achèvement; la durée des travaux devait être de trois ans; la dépense devait être remboursée au moyen des six premiers termes de la souscription et d'un emprunt fait à la Caisse des dépôts et consignations, dont les souscripteurs eurent à payer les intérêts en outre des 375 francs de leur cotisation. Moyennant ce versement les souscripteurs eurent le droit d'arroser à perpétuité les terres engagées par eux, sauf la répartition annuelle des frais d'entretien et d'administration. L'association est régie par un syndicat de 11 membres, un pour chaque commune arrosée, constitué le 1er avril 1853. L'organisation syndicale est parfaitement semblable à celle du canal de Cadenet, décrite dans les *Annales des ponts et chaussées* (Lois, décrets, etc. — (1er septembre 1855).

Les travaux de la ligne principale ont été commencés en octobre 1854, avec le concours d'une subvention de 400,000 francs accordée par l'État. Les eaux ont été introduites au mois de mars 1857.

Description. — Le canal de Carpentras a sa prise d'eau à la Durance, auprès du rocher de Mérindol; cette prise est commune aux trois associations de Cabedan-Neuf, de l'Isle et de Carpentras. De même le canal de Cabedan-Neuf, élargi et rectifié dans ses parties défectueuses, est commun aux trois associations sur une longueur de 18 kilomètres jusqu'au pont Pérussier : le canal de l'Isle est commun aux deux associations inférieures, sur une longueur de 6 kilomètres, entre le pont Pérussier et la tour de Sabran, où commence le canal de Carpentras proprement dit. Un syndicat mixte est chargé d'administrer la partie commune du canal principal.

La portée légale de ces canaux est la suivante :

	Mèt. c
Pour le canal de Cabedan-Neuf.	2
— de l'Isle.	2
— de Carpentras.	6
Total.	10

Mais comme ces portées ne se rapportent qu'au temps de plus bas étiage de la Durance, on a donné à l'origine une portée de 16 mètres qui se réduit à 12 mètres au pont Pérussier et à 9 mètres à la tour de Sabran.

Les terres que leur situation permet d'arroser dans le périmètre de chaque association présentent les contenances suivantes :

	Hectares.
Association de Cabedan-Neuf et du plan oriental. .	4,500
— de l'Isle.	5,800
— de Carpentras.	16,639
Total.	26,939

Sur cette contenance totale on arrosait au commencement de l'année 1862 :

	Hectares.
Dans le périmètre de Cabedan-Neuf.	1,400
— de l'Isle.	1,600
— de Carpentras.	6,000
Total.	9,000

Le développement de la ligne principale de la prise d'eau à Mérindol, jusqu'au point de déchargement dans la rivière de l'Aigues à Travaillans, est de	83,357^m 48
Les grandes dérivations, au nombre de cinq, ont ensemble une longueur de.	32,719^m 20
Le développement total des rigoles de distribution dites filioles est de	362,588^m 60
Longueur totale du réseau. . . .	478,665^m 28

Tracé. — En partant de la tour de Sabran, le canal traverse la route nationale n° 100 de Montpellier à Digne, vient passer sur le vallon de Saint-Nicolas, puis franchit le célèbre vallon de Vaucluse sur le pont-aqueduc de Galas, le plus grand ouvrage d'art de toute la ligne.

Le canal se développe ensuite sur les coteaux de Saumanes, Velleron et Pernes, en épousant avec soin les formes du terrain. Il passe en tunnel sous le boulevard de la ville de Pernes, franchit le torrent de la Nesque, et s'étend dans les plaines arides comprises entre Pernes et Carpentras. Il traverse le contre-fort de Carpentras au moyen d'un souterrain de 330 mètres de longueur, le torrent de Lauzon sur un pont-aqueduc, la route départementale de Carpentras à Orange au moyen d'un siphon en béton, et se développe ensuite sur les coteaux jusqu'à Sarrians. Dans ce dernier parcours il traverse les torrents de Mèdes, Brégoux et Salettes au moyen de siphons en béton, les torrents de Lauchun et Syrel au moyen de ponts-aqueducs. Enfin le canal perce le contre-fort qui sépare ces torrents de la vallée de l'Ouvèze, au moyen d'un souterrain de 1030 mètres de longueur, traverse l'Ouvèze par un siphon en béton de 80 mètres de longueur, et va se décharger dans l'Aigues près de Travaillans.

Profil en long. — Le profil en long fait voir que la pente longitudinale par kilomètre varie de 0^m,28 à 0^m,20 entre la tour de Sabran et l'Aigues ; ces pentes sont suffisantes, parce que dans cet intervalle, dont l'origine est à 24 kilomètres de la Durance, les eaux n'arrivent qu'après avoir déposé une partie des matières en suspension. Les pentes sont augmentées dans la traversée des ouvrages d'art et des souterrains, afin d'en réduire les dimensions.

NUMÉROS DES PIQUETS.	DÉSIGNATION DES LOCALITÉS.	DISTANCES.	COTES NOIRES.	COTES BLEUES.	PENTES PAR MÈTRE.	OBSERVATIONS.
0	Prise d'eau en Durance.		108,13	109,88		
		336,00			0,0010	Chute de 0,25.
2	Id.		107,79 107,41	109,54 109,29		
		2516,80			0,0012	Chute de 2,60.
»	Chute de Malan.		104,42 101,82	106,17 103,57		
		1948,30			0,0012	Chute de 1,40.
»	Chute de Rigalon. . . .		99,67 98,27	101,42 100,02		
		1831,00			0,0015	Chute de 1,01.
58	Chute de la Roquette. .		95,62 94,51	97,27 96,26		
		11478,20			0,0004	Chute de 0,25 au niveau de l'eau.
98	Prise d'eau de l'Isle au pont Pérussier. . . .		89,92 »	91,67 91,42	»	
		3707,95			0,0005	
»	Pont aqueduc de Coulon.		88,81	90,31		
		64,70			0,0012	
»	Id.		88,75	90,25		
		1243,25			0,0005	
177	Plafond du canal de l'Isle		88,16	89,66		
		5655,00			0,00028	
191	Pont-aqueduc de Galas. .		86,58	88,08		
		160,00			0,0010	
192	Id.		86,40	87,90		
		11591,00			0,00026	
294	Id.		82,66	84,16		
		765,20			0,0005	
307	Pont-aqueduc de la Nesque.		82,28	83,78		
		7058,80			0,00025	Relèvement du fond de 0,30.
351	Souterrain de Carpentras.		80,52 80,82	82,02 »		
		600,00			0,0005	
362	Pont-aqueduc de Lauron		80,52	81,72		
		400,00			0,000275	
371	Id.		80,37	81,57		
		25060,00			0,00020	
»	Souterrain de la Garrigue		75,76	76,96		
		1050,00			0,0005	
»	Id.		75,24	76,44		
		76226,10				

Profils en travers. — La hauteur de l'eau dans le canal étant de $1^m,50$ de la tour de Sabran jusqu'à Carpentras, et de $1^m,20$ de Carpentras jusqu'à l'Ouvèze, on s'est servi pour calculer les largeurs moyennes de la formule de Tadini, indiquée par M. Nadault de Buffon,

$$Q = 50\, L h \sqrt{hi}$$

dans laquelle Q représente le débit, L la largeur moyenne, h la hauteur et i l'inclinaison longitudinale par mètre. On a reconnu par quelques vérifications qu'elle est suffisamment exacte. D'après cette formule, les divers profils du canal de Carpentras, tels qu'ils sont donnés par la planche XVII, correspondent aux débits suivants :

	Mètres.
De la tour de Sabran à la vallée de Vaucluse	8,84
De la vallée de Vaucluse à Pernes	8,91
De Pernes à Carpentras	7,64
De Carpentras au torrent de Mèdes	4,46
De Mèdes à Aubignan	4,00
D'Aubignan à l'Ouvèze	2,60
Pont-aqueduc de Saint-Nicolas	8,53
Pont-aqueduc de Galas	8,71
Souterrain de Pernes	7,87
Souterrain de Carpentras	4,26
Souterrain de l'Ouvèze	2,43

Au moyen des valeurs de L déduites de la formule précédente, les profils en travers types ont été établis d'après les principes suivants : des banquettes règnent le long du canal ; celle de droite, généralement en déblai, a 1 mètre de largeur ; elle est accompagnée d'un fossé conforme à celui des routes. La banquette de gauche, en remblai d'ordinaire, a $1^m,50$ de largeur ; ces banquettes sont placées à $0^m,50$ au-dessus du niveau de l'eau. Les talus intérieurs du canal sont inclinés à 1 et demi de base pour 1 de hauteur dans les déblais de terre et les remblais. Ils sont inclinés suivant 1 de base pour 3 de hauteur dans le rocher, mais alors le remblai est revêtu d'un mur en maçonnerie ordinaire avec mortier de chaux hydraulique pour éviter les filtrations. La planche I donne tous les détails des profils en travers dans tous les cas qui se sont présentés.

Ouvrages d'art. — Les ouvrages d'art sont construits en maçonnerie ordinaire avec les parements en moellons d'appareil, les angles et les bandeaux des voûtes en maçonnerie de pierre de taille. On a recherché avec le plus grand soin toutes les carrières à proximité des ouvrages, et partout on en a trouvé d'assez voisines pour que les matériaux revinssent à très-bon marché. Les pierres sont de la molasse coquillière; quelques moellons sont en calcaire argileux.

La chaux a été fabriquée spécialement pour le canal ; elle est éminemment hydraulique; l'extinction en est même très-difficile, parce qu'elle se rapproche beaucoup des ciments. Pour éviter les déchets énormes que donnaient les procédés ordinaires d'extinction, on a broyé la chaux entre deux meules à sa sortie du four. On a employé 360 kilogrammes de chaux en poudre par mètre cube de sable. Les mortiers sont excellents et durcissent très-vite.

Le tracé présente neuf ponts-aqueducs, six aqueducs-siphons, seize ponts par-dessus le canal pour passage de routes et chemins.

Prise d'eau. — La planche XVIII indique avec assez de détails les dispositions de la prise d'eau en Durance, pour qu'il n'y ait pas lieu d'insister. Les figures 1 et 2 planche XIX la complètent en montrant sur une plus grande échelle la disposition des vannes. Elles sont en fonte, fortifiées en amont par deux nervures diagonales et garnies sur la rive d'une bande en bois, glissant sur un cadre en fer fixé sur la maçonnerie.

Ponts-aqueducs. — Le pont-aqueduc sur le torrent du Coulon est un grand ouvrage formé de cinq arches surbaissées en anse de panier de 9 mètres d'ouverture et 3 mètres de flèche. Il a 58 mètres de longueur totale et sa tablette de couronnement s'élève à $5^m,67$ au-dessus de l'étiage de la rivière.

Le pont-aqueduc de Saint-Nicolas a deux arches en plein cintre de 6 mètres d'ouverture, et la tablette est à $11^m,40$ au-dessus du fond du ravin. Il a coûté 9,000 francs.

Le pont-aqueduc de Galas sur le vallon de Vaucluse est le principal ouvrage d'art du canal : son emplacement était marqué par la configuration des lieux à la jonction des vallées de déchirement et d'érosion, en un point où le vallon de Vaucluse offre un minimum de largeur. Il est formé de 13 arcades de 9 mètres d'ouverture : sa hauteur maximum est de $24^m,50$ au-dessus de l'étiage de la Sorgue. Sa longueur totale est de $159^m,20$.

On a établi les fondations des piles n°s 3 et 4 dans des enceintes de pieux et palplanches; on a dragué dans ces enceintes, pour la pile n° 3, jusqu'au rocher; pour la pile n° 4, jusqu'au gravier résistant, puis on a coulé le béton jusqu'à la hauteur de $1^m,60$, en contre-bas du socle; pour les piles n°s 5, 6, 7 et 8, on a fouillé, en épuisant jusqu'au gravier, puis on a coulé le béton sur cette même hauteur de $1^m,60$. Sur ce prisme de béton on a établi une première assise dont le parement est en libages et le milieu en béton; à celle-ci on a superposé le socle de $1^m,20$ de hauteur, entièrement construit en libages. La première assise de chaque pile, celle du milieu et celle du couronnement, sont également en libages pleins.

Le montage des matériaux était fait d'une manière très-simple; un câble en fil de fer traversait la vallée; il était supporté au droit des piles n°s 5 et 8 par deux bigues; des moufles étaient attachées à ce câble, et des bœufs tirant sur l'extrémité du garant par l'intermédiaire d'une poulie de renvoi opéraient le montage des matériaux. Il est inutile d'ajouter qu'un pont de service réunissait les deux rives de la Sorgue.

Les pressions supportées par les piles sont les suivantes : à la hauteur des naissances, $4^k,30$ par centimètre carré; sur les socles, $5^k,30$; sur la première assise, $6^k,30$.

	Francs.
Les fondations ont coûté..........	18,400
Le pont-aqueduc au-dessus du socle.....	108,000
Total.......	126,400

Le pont-aqueduc sur le torrent de l'Enrajat, avec vanne de décharge, est représenté planche XIX, fig. 8 à 10.

Le pont-aqueduc sur le torrent de la Nesque est composé de deux arches en plein cintre de 6 mètres d'ouverture. La longueur totale de l'ouvrage d'art est de $26^m,70$, et la hauteur de la tablette au-dessus du lit du torrent est de $6^m,60$. Il est fondé sur la roche argileuse, connue sous le nom de saffre dur. Il a coûté 9,500 francs.

Le pont-aqueduc sur le torrent de Lauzon offre des dispositions analogues avec un peu plus de hauteur ($7^m,50$); il a coûté 11,000 francs.

Le pont-aqueduc des Cinq-Cantons est le plus grand ouvrage d'art de la ligne après celui de Galas; il est formé de 35 arcades en plein cintre de 6 mètres d'ouverture. La longueur totale est de $265^m,19$, et sa hauteur maximum est de 11 mètres environ au-dessus du fond de la vallée.

Les ponts-aqueducs sur les torrents de Lauchun et de Syzel ont l'un 6 mètres, l'autre 4 mètres d'ouverture; le premier a coûté 7,500 francs, le second 3,500 francs.

Le premier siphon que l'on rencontre en descendant le canal est le pont-siphon établi sous le chemin de l'Isle, aux abords de Pernes. C'est un pont biais

en arc de cercle de 5 mètres d'ouverture, et de 0m,90 de flèche, avec 0m,60 d'épaisseur à la clef. La pression exercée en ce point est due à une différence de 0m,60 de hauteur d'eau.

Le pont-siphon établi sous le chemin de Saint-Labre, près Carpentras, offre les mêmes dimensions, mais il est droit, et la pression à la clef est de 0m,90.

L'aqueduc-siphon de Carpentras franchit un carrefour, où viennent se réunir les routes départementales nos 4 et 5, l'avenue de Notre-Dame-de-Santé, et le chemin de Caromb. Il est formé de deux tuyaux parallèles en béton de 1m,50 d'ouverture, offrant 0m,60 d'épaisseur au sommet et sur les côtés, 0m,30 seulement à la partie inférieure, et 0m,40 à la hauteur des centres pour la cloison de séparation. La pression au sommet est de 1m,69; la longueur est de 20 mètrès.

Les aqueducs-siphons sous les torrents de Mèdes, de Brégoux et de Salettes, offrent les mêmes dispositions générales que le précédent. Ce type a été répété quatre fois (fig. 3 à 7, pl. XIX).

L'aqueduc-siphon de l'Ouvèze n'offre qu'un seul tuyau de 1m,70 de diamètre, et de 80 mètres de longueur.

Ponts. — Les ponts par-dessus présentent plusieurs types suivant les ouvertures et suivant les largeurs entre les têtes. Leur prix varie entre 700 francs et 2,400 francs, y compris les abords, chaussées, etc.

Quelques-uns de ces ponts offrent des dispositions toutes particulières; tantôt des passages de filioles, dans des buses en bois ou dans de petits canaux en pierre, sont ménagés contre l'une des têtes du pont; tantôt c'est un torrent qui franchit le canal à côté de la chaussée (pont du torrent Rigalon et de la route départementale n° 3).

Le pont de la grande Bastide donne passage à la fois à un chemin et au canal de décharge du moulin de Saint-Ferréol; la fuite de ce canal et une vanne de décharge du canal d'irrigation sont accolées au pont.

D'autres ponts, tel que celui du Ritord, et tous ceux construits sous les chemins entre la tour de Sabran et le souterrain de Pernes, accompagnés de filioles coulant dans les fossés, sont pourvus de siphons, passant sous le canal au droit de la tête aval.

Les ponts, ponceaux et aqueducs par-dessous, offrent encore un grand nombre de dispositions très-variées; les uns voûtés, les autres dallés; d'autres encore formés de simples tuyaux en poterie de 0m,30 de diamètre. Si l'on excepte deux ponts par-dessous, qui ont coûté 1,800 francs, les autres coûtent de 600 à 1,300 francs.

Les déversoirs avec vanne de décharge coûtent de 1,500 francs à 1,800 francs, suivant le prix des matériaux (fig. 8 à 9, pl. XVIII).

Les résultats obtenus dans les cultures qui profitent dès à présent des eaux d'irrigation donnent amplement satisfaction à toutes les espérances qu'on avait pu concevoir. Les mauvaises garrigues qui, en 1854, se vendaient à grand'peine 200 francs l'hectare, se payaient déjà en 1860, avant la mise en culture, par le seul fait d'être arrosables, 1,200 francs l'hectare. Les bonnes terres des environs de Carpentras, dans la vallée de Lauzon, se louent de 135 à 150 francs l'hectare; le jour où l'eau y arrive les fermiers se les disputent à 325 et 390 francs l'hectare.

2° Canal dérivé du Drac, destiné à l'irrigation du bassin de Gap (Hautes-Alpes)

Le canal dérivé du Drac et destiné à l'irrigation du bassin de Gap (Hautes-Alpes) est une des grandes opérations agricoles de ces dernières années ; elle touche à sa fin après de nombreuses vicissitudes. L'histoire en est intéressante. Pour faire connaître l'entreprise, nous commencerons par donner une analyse et des extraits du rapport présenté vers 1860 par M. l'ingénieur Houllier, qui contribua pour beaucoup à faire décider l'exécution du projet. Le plan général du canal et du bassin de Gap est donné par la planche XXII.

Utilité du canal. — La création d'un canal à dériver du Drac et destiné à l'irrigation du bassin de Gap est d'une importance vitale pour le territoire du chef-lieu et des communes environnantes. Les populations intéressées s'en préoccupent depuis longtemps. Tout le monde comprend que cette entreprise serait une source féconde de richesses agricoles, et que seule elle peut ouvrir la voie aux autres progrès qu'il est permis d'espérer dans la contrée.

Le bassin de Gap est en général bien exposé, largement développé. Il offrirait l'exemple d'une fertilité remarquable, sans la sécheresse qui se manifeste dès la fin du mois de juin et qui paralyse tous les efforts du cultivateur. Les routes et chemins qui le sillonnent en rendent l'exploitation facile. L'eau seule fait défaut.

Arrosages anciens du bassin de Gap. — L'irrigation paraît avoir été, il y a quelques siècles, plus développée qu'aujourd'hui. Un canal dont il reste des vestiges amenait les eaux du torrent d'Ancelles et l'on recueillait celles de la Bâtie-Neuve. Ces ressources n'existent plus. On en attribue l'abandon à la peste, à la guerre et aux incendies qui ont désolé le pays. Sans contester l'influence de ces fléaux, en admettant même qu'autrefois les cours d'eau alimentaires aient été mieux pourvus en été à cause de la présence des forêts sur les montagnes, nous inclinons à penser que ces ressources n'ont jamais dû être bien considérables, et qu'elles resteraient certainement aujourd'hui fort inférieures aux exigences des intérêts actuellement en cause.

Le progrès naturel des idées et la nécessité de suivre l'essor imprimé de toutes parts à l'agriculture ont poussé le public à diriger ses regards vers la Durance ou vers le Drac.

L'émoi a gagné les esprits et on a agité des projets même avant d'être en possession des données qui pouvaient leur servir de base. De là des erreurs que nous voulons détruire, bien que ce point n'offre guère aujourd'hui qu'un intérêt historique.

Impossibilité d'une dérivation de la Durance. — Pour amener les eaux de la Durance sur le territoire de Gap, il faudrait, afin d'avoir la pente nécessaire, aborder le cours de la Durance à 910 mètres environ au-dessus du niveau de la mer. Cette hauteur ne saurait se rencontrer qu'aux environs de la Roche sous Briançon, et non en face d'Embrun, comme on se l'imagine. Entre la Roche et Gap le canal offrirait par suite un développement d'à peu près 90 kilomètres. Il passerait au-dessus de la ville d'Embrun. — Si l'on considère le nombre et la nature des obstacles à traverser, on se convaincra que la dépense serait hors de

proportion avec les bénéfices futurs. Dans ces conditions, d'ailleurs, le canal n'arriverait guère que sur le plateau de Puy-Maure en face de Gap, et laisserait en dehors de son périmètre une portion très-notable du territoire à fertiliser.

Ce projet ne supporte *même pas un examen sommaire.*

Dérivation du Drac, seule praticable. — Reste donc le Drac, dont le cours, bien moins abondant que celui de la Durance, est pourtant alimenté par les neiges éternelles, spécialement la branche de Champoléon.

De ce côté, nous rencontrons encore une idée fausse, accréditée dans le public.

Jaugeage du Drac, le 20 *fructidor an* X. — Un premier jaugeage du Drac d'Orcières seul a été exécuté le 20 fructidor an X.

Le procès-verbal de ce jaugeage constate une section de $4^{m},24$ sans indiquer la vitesse, et de plus le volume de la dérivation n'est pas déterminé. Il est entaché d'erreur, car le débit du Drac descend à 550 litres par seconde, et la section à $0^{m},612$. Ce volume n'arroserait que 550 hectares, et on se propose d'étendre cet arrosage à 4000 hectares.

La conclusion du procès-verbal a entretenu cette erreur que les eaux du Drac d'Orcières suffisaient, et qu'on pouvait les amener à ciel ouvert. Malheureusement, l'appréciation est entachée d'un vice originel qui infirme toute conclusion.

Sans autre étude sérieuse, la loi du 23 pluviôse an XII vint ordonner l'exécution des travaux, et mit la dépense à la charge de la ville de Gap, des communes et des propriétaires intéressés. Il aurait été pourvu à ces dépenses dans la forme prescrite par la loi du 14 floréal an XI. Un emprunt pouvait être autorisé.

Cette loi avait été sollicitée par les conseils municipaux de Gap, de Romette et de la Rochette après un devis sommaire de 405 000 fr.

M. de Champagny, ministre de l'intérieur (an XIII), promit, au nom de l'Empereur, 100 000 fr., si les intéressés s'organisaient sérieusement.

L'affaire en resta là par le défaut d'entente des propriétaires et par la difficulté de contracter un emprunt.

Le principe de l'association forcée doit être regardé comme la principale cause d'insuccès de cette première combinaison.

Projet étudié en 1829 *par M. l'ingénieur Sévénier.* — Le premier projet précis date de 1829. M. Sévénier suppose encore que le Drac d'Orcières est en état d'alimenter le canal, mais il n'en a pas l'air bien convaincu. Au mois de novembre 1821, il avait calculé un débit de $19^{m},4$ par seconde dans ce cours d'eau : cependant il proposa une branche de secours amenant les eaux du Drac de Champoléon.

M. Sévénier suppose une superficie arrosable de 3600 hectares, et admet une dérivation de $1^{m},20$ par seconde. Son canal débouche à ciel ouvert dans le bassin de Gap au col de Bayard, et à partir de là se divise en deux branches, qui se dirigent l'une vers les coteaux de Charance jusqu'au torrent de Malcombe, et l'autre jusqu'au village de la Rochette sans le dépasser.

D'après un avant-métré régulier, les dépenses étaient évaluées à un total de 645 000 fr.

Ce projet laisse à désirer sous plus d'un rapport.

Dans le périmètre qu'il embrasse, il y a bien 3600 hectares de terre, mais il faut pour cela renoncer aux cultures non arrosables, telles que les céréales.

De plus, une dérivation de $1^{m},20$ par seconde ne desservirait que 1200 hecta-

res et non 3600. — Le prix de revient de l'arrosage serait 537 fr. par hectare, sans compter les rigoles de distribution et les frais d'entretien et de surveillance, dont il n'est pas parlé.

De toute nécessité il faut donc recourir au Drac de Champoléon.

Or, sur le flanc gauche de ce Drac, il existe des talus fort raides, recouverts d'une couche épaisse de pierres sans liaison et détachées des roches supérieures. Ces passages s'appellent des *casses*. L'inclinaison de ces talus atteint la limite d'équilibre; cela résulte de leur mode même de formation.

La mobilité en est extrême, et dans un pareil terrain il faudrait absolument s'enfoncer en galerie dans la roche vive.

Le projet admet, dans ces passages, une voûte de 2060 mètres de longueur, dont les piédroits reposeraient sur le sol inconsistant que nous venons de décrire. Nous ne connaissons pas de moyen propre à garantir la stabilité d'un pareil ouvrage.

Le projet précédent a eu toutefois l'avantage de donner une certaine fixité aux idées.

Le projet de 1829 a fait naître l'idée d'un souterrain sous la montagne de Gap. — En face de la nécessité de ce souterrain entre les deux Dracs, on s'est demandé s'il ne serait pas préférable d'abaisser le niveau du canal de façon à opérer la prise d'eau au confluent même des deux Dracs, et de passer en galerie sous la montagne de Gap.

Cette galerie offre sans doute plus de développement que celle des casses de Champoléon (2060 mètres); mais c'est le seul inconvénient, et il y a plusieurs avantages.

On économise la construction du canal : 1° sur la longueur de 10 200 mètres comprise entre le Drac de Champoléon et un point pris en face de son confluent avec le drac d'Orcières, et 2° sur celle qui s'étend depuis l'entrée de la galerie jusqu'au point d'émergence du canal sur le plateau de Bayard. Les frais d'entretien sont diminués : le niveau du canal étant abaissé de 100 mètres, l'eau pourra être mise au service de l'industrie pendant la saison étrangère aux arrosages, ce qui dans le premier cas serait impossible, à cause des neiges et des glaces.

Enfin on est en outre dispensé de la traversée du drac d'Orcières, dont la longueur n'a pas moins de 400 mètres, et pour laquelle rien n'est prévu dans les anciens projets.

Le prix de revient montrera d'ailleurs que ces avantages sont décisifs.

On laisse, il est vrai, une zone de 100 mètres de hauteur en dehors de l'arrosage; mais cette zone ne profiterait guère de l'opération. Ainsi le canal passera encore à 400 mètres de distance et au-dessus du château de Charance. A 100 mètres plus haut, on ne ferait qu'arroser des rochers ou un sol peu susceptible de culture, tout en augmentant les frais de construction dans ces terrains abruptes.

Projet dressé en 1847 par M. l'ingénieur en chef Uhrich. — C'est à cette idée d'un souterrain sous la montagne de Gap que s'est rallié en 1847 M. l'ingénieur en chef Uhrich, et son projet a servi de base au projet actuel.

La première question à éclaircir était le jaugeage du Drac.

Deux observations de M. Uhrich en septembre 1846, immédiatement à l'aval du confluent, ont donné un débit minimum de $6^{m},88$ par seconde.

L'opération fut répétée le 7 septembre 1847 sur les deux branches à l'amont du confluent. L'été avait été peu pluvieux, car du 1[er] juin au 1[er] septembre il

n'était tombé que 0m,151 de pluie. La rivière pouvait être regardée comme ayant atteint un de ses étiages les plus bas.

Le jaugeage par la méthode des flotteurs donna 5m,47 à la seconde pour le débit des deux branches réunies.

Ce résultat satisfaisant est encore trop faible pour deux raisons : 1° sur une petite section, comme celle du Drac d'Orcières, le flotteur s'arrête fréquemment sur les bords ou heurte les gros galets du fond; 2° on n'a pas tenu compte d'une dérivation d'au moins 500 litres à la seconde, alimentant une usine située sur la rive gauche du Drac d'Orcières, et rendue au cours d'eau naturel, seulement à l'aval du confluent des deux Dracs.

M. l'ingénieur Houllier s'est livré, en 1859, à des observations de même nature, pendant le mois d'août et dans les circonstances les plus exceptionnelles sous le rapport des basses eaux. En effet, la hauteur de neige tombée à Gap pendant l'hiver n'a été que de 0m,762, tandis qu'elle était de 1m,137 dans l'hiver 1857-1858, et 1m,71 en l'hiver 1859-1860. Le débit du Drac en été dépend essentiellement de la quantité de neige amassée. L'été de 1859 a été excessivement chaud et sec de très-bonne heure. Le peu de pluie tombée (0m,044 répartie en 7 jours et 3 séries) est rentrée dans l'atmosphère par l'évaporation ou a été retenue dans le sol par la végétation.

Ces circonstances réunies ont fait que l'étiage d'été de 1859 a été exceptionnellement bas.

Néanmoins, le débit, calculé sur plusieurs sections et par plusieurs méthodes, ne s'est pas abaissé au-dessous de 4500 litres pour les deux Dracs réunis.

L'administration ayant prescrit d'assurer 1 litre par hectare et par seconde à chaque souscripteur et la superficie arrosée devant s'élever à 4000 hectares, le volume à dériver sera de 4000 litres. Ce volume a toujours été disponible dans le Drac en 1859, bien qu'on n'ait jamais vu un étiage aussi bas.

Ici il y a lieu de faire une remarque essentielle : tout en donnant satisfaction aux droits d'arrosage acquis sur le bord du Drac, l'accroissement des ressources de cette rivière, à mesure qu'on descend son cours, est assez rapide pour qu'il reste toujours dans le lit un volume disponible supérieur à celui qui est constaté à la prise d'eau projetée. On pourrait à la rigueur assécher le Drac au confluent sans léser les intérêts des parties basses de la vallée.

En effet, le lit du Drac d'Orcières est fort large et se compose d'une couche graveleuse et perméable d'une épaisseur de 6 à 7 mètres. En pratiquant une galerie souterraine, à l'amont de la prise, en travers de ce lit et au niveau des terrains sur lesquels reposent les graviers, on réunirait la plus grande partie des filtrations, et on en amènerait le produit dans le canal. La pente du lit est supérieure à 2 centimètres, et un pareil travail serait facile.

Ce serait là une ressource considérable qui se rencontre sur beaucoup de rivières des Hautes-Alpes ; au produit apparent de l'étiage, il faut ajouter un débit souterrain considérable qui se fait à travers les sables et graviers dont le lit est encombré sur une grande profondeur. Toutes les eaux visibles peuvent être accaparées, sans que les canaux d'aval soient en souffrance, parce que de nouvelles eaux surgissent du lit dont la pente est très-prononcée.

Les constructions en rivière prouvent à chaque instant l'existence de ces filtrations. Donc le volume d'eau de 4 mètres par seconde, à dériver du Drac, n'a rien qui doive effrayer personne, même en temps de basses eaux. Du reste, il est facile d'introduire dans l'acte de concession une clause ménageant les droits acquis.

Projet de 1847. Dispositions et dépenses. — M. l'ingénieur Uhrich plaçait avec raison la prise d'eau au confluent des deux Dracs, mais préoccupé par la pensée d'utiliser le souterrain pour la rectification de la route nationale n° 85, en même temps que pour le canal, il proposa d'établir ce souterrain vers la partie occidentale de la montagne de Gap, du côté du col de Bayard, entre le ravin de Bonne au-dessus de Saint-Laurent (versant du Drac), et celui du Buzon (versant de Gap). Il présenta cependant une évaluation de dépenses pour le canal considéré isolément, et cette dépense s'élevait à 2 190 000 francs.

Le volume dérivé était fixé à 3 mètres par seconde, et supposé devoir suffire à l'irrigation de 4000 hectares; le prix de revient par hectare arrosé s'élevait donc à 547fr,50.

La cuvette adoptée pour le canal principal avait une largeur au plafond de 2m,50, une largeur en gueule de 6m,40 et une profondeur de 1m,30; avec une pente de 0m,005 par mètre, le débit de cette section est d'environ 3 mètres à la seconde.

L'administration ne voulut pas que l'on traitât ensemble la question de route et de canal, et engagea à chercher un projet moins coûteux.

Projet définitif. — A l'émergence du souterrain, les eaux doivent être divisées à droite et à gauche, dans des rigoles maîtresses, de manière à former une ceinture à peu près complète autour du bassin de Gap; on pensa en conséquence qu'il y avait intérêt à déboucher dans le bassin avec le moins de charge possible. Cette pensée conduisit, comme le montre le plan général, planche XXII, à entrer en galerie dès le torrent d'Ancelles, à passer sous le col de Manse, et à placer l'issue du souterrain au-dessus de Romette dans une prairie marécageuse située vers la source du torrent de Flodence. Les conditions de construction restant les mêmes, on est fondé à regarder comme une économie presque totale la suppression du canal entre le torrent d'Ancelles et Saint-Laurent, sur 5653 mètres de longueur.

Le prix du mètre de déblai de rocher fut réduit de 35 à 30 francs en évaluation.

Au lieu d'un chemin empierré de 3m,50 sur le bord du canal, on projeta une chaussée de 2 mètres sans empierrement. Ce qui permit de réduire considérablement les ouvrages d'art et les murs de soutènement.

Trois casses entre la prise d'eau et le tunnel devaient donner lieu à des cuvettes en maçonnerie de mortier reposant sur maçonnerie sèche; il a été trouvé avantageux de substituer à ce travail un aqueduc couvert fondé sur le terrain solide que la sonde montrait à 1m,65 pour le premier point, 3m,32 pour le second, 1m,42 pour le troisième.

On chercha à réduire le cube des terrassements tout en élevant de 3 mètres à 4 mètres la portée du canal; à cet effet, on résolut d'adopter, pour la cuvette, des talus à 45°; la largeur au plafond était de 2 mètres, la largeur en gueule de 5m.20, la profondeur de 1m,60, et la hauteur de la tranche d'eau de 1m,27. La vitesse moyenne atteignait 0,976.

Pour les ponts-aqueducs, on adopta une largeur aussi réduite que possible, 4m,70 entre les têtes, et on se contenta de flanquer la cuvette d'une passerelle en encorbellement de 1m,25 de large.

Le projet de M. Uhrich supposait que les têtes du souterrain seraient revêtues en maçonnerie sur 300 mètres de longueur; M. Houllier crut pouvoir réduire cette longueur à 150 mètres; la roche à percer est un calcaire noir, un peu argileux, de la formation du lias; il se délite sous l'influence des intempéries,

et c'est lui que rongent sans cesse et qu'emportent par miettes les torrents des Hautes Alpes.

La section primitive du souterrain en rocher avait été prévue avec une largeur de $1^m,80$ et une hauteur totale de $2^m,40$, y compris le plein cintre de $0^m,90$ de rayon. On réduisit la largeur à $1^m,30$ et la hauteur à 2 mètres, y compris un plein cintre de $0^m,65$ de rayon. La pente en souterrain fut fixée à 0,005; la vitesse atteignait $2^m,402$, et donnait un débit de 4 mètres avec une hauteur d'eau de $1^m,35$.

Grâce à ces modifications, qui ont produit de bien mauvais résultats, comme on le verra plus loin, on arriva à réduire l'évaluation de la dépense à 1 500 000 francs.

Voici, résumées dans le tableau ci-après, les conditions principales du projet définitif de 1859, conditions que le lecteur pourra suivre sur le plan général du canal :

TRACÉ DU TRONC PRINCIPAL.

SUBDIVISIONS DU CANAL.	LONGUEUR.	PENTE DU FOND PAR MÈTRE.	ALTITUDE À L'ORIGINE ET À LA FIN.	OBSERVATIONS.
De la prise d'eau à 300 m. plus loin.	500	0,0025	1170,75 1170,00	La prise sera au confluent des deux Dracs immédiatement au-dessous. La forte pente favorisera l'introduction.
De ce point à 120 mètres en avant de l'entrée du souterrain, sur la rive gauche du torrent d'Ancelles.	12900	0,0005	1170,00 1163,55	Cuvette normale du canal. . . . . { larg. au fond $2^m,00$. profondeur. . $1^m,60$. gueule. . . . $5^m,20$. talus à.. . . . 45°. Largeur en couronne de la chaussée de droite 2 mètres. Larg. de la chaussée de gauche. . . . . . . { $1^m,00$ (déblai). $1^m,20$ (remblai). Inclinaison des talus.. . { Déblai (45°). Remblai : 3 de base pour 2 de hauteur. Il ne sera fait d'exceptions que dans la traversée des rochers et des casses, le projet définitif indiquera les dérogations.
De ce dernier point à l'émergence dans le bassin de Gap.	3760	0,005	1163,55 1144,75	Ceci comprend sous le col de Manse un souterrain de 3640 mètres. La section, ouverte dans le rocher avec des puits de 100 mètres au plus, sera un rectangle de $1^m,30$ de large sur $1^m,35$ de haut et surmonté d'un demi-cercle. Sur 150 mètres à chaque tête, il y aura un revêtement en maçonnerie de $0^m,22$.
Longueur totale. . .	16960 mèt.	Abaissement total. .	$26^m,000$	

Partage des eaux à l'issue du souterrain de Manse. — Les eaux, reçues dans un réservoir, puis partagées entre deux rigoles maîtresses, seront dirigées à droite vers les coteaux de Charance, et à gauche vers la Rochette et la Bâtie-Neuve. Ces deux rigoles ouvertes à flanc de coteau formeront la ceinture du périmètre du territoire arrosable.

TRACÉ DE LA RIGOLE MAITRESSE DE DROITE.

SUBDIVISIONS.	LONGUEUR.	PENTES PAR MÈTRE.	ALTITUDES A L'ORIG. ET A LA FIN.
De l'issue du souterrain de Manse au torrent de Malcombe.	9100	0,0005	1144,75 1140,20
Du torrent de Malcombe au ravin situé en deçà du domaine de Quint.	4000	0,001	1140,20 1136,20
Portion empruntée du lit du ravin de Quint. Chute de 160m,08.	»	»	1136,20 976,12
Du ravin de Quint au premier chemin après la limite des communes de Pelleautier et de Sigoyer.	8590	0,001	976,12 967,53
Longueur totale. . . .	21690 mèt.	Abaissement total. .	177m,22

TRACÉ DE LA RIGOLE MAITRESSE DE GAUCHE.

SUBDIVISIONS.	LONGUEUR.	PENTES PAR MÈTRE.	ALTITUDES A L'ORIG. ET A LA FIN.
De l'issue du souterrain au torrent de Font-Bonne.	4150	0,001	1144,75 1140,60
Portion empruntée du lit de ce torrent. .	»	»	1140,60 854,01
Du torrent de Font-Bonne à la route nationale n° 94.	2200	0,001	854,01 851,81
De la route nationale n° 94 aux marais de la Pallue.	6700	0,001	851,81 845,51
Des marais de la Pallue à Sainte-Marguerite.	7000	0,001	845,51 838,11
Longueur totale. . . .	20050 mèt.	Abaissement total. .	306m,64

DÉCRET DE CONCESSION DU 11 AVRIL 1863.

Ainsi, d'après le projet, la dépense de premier établissement s'élevait seulement à 1 500 000 francs pour 4000 hectares, soit à 375 francs par hectare arrosé.

Pour compléter les charges, on ajoutait une somme annuelle de 20 000 francs, destinée à subvenir aux frais de personnel, d'entretien et d'administration.

C'est sur ces bases que le canal de Gap fut concédé au sieur X, avec le droit

de percevoir des propriétaires arrosants une subvention annuelle de 23 francs par hectare.

Le décret de concession est du 11 avril 1863. Nous en reproduirons les principaux articles :

ARTICLE 1er.

Le Canal du Drac destiné à l'irrigation du bassin de Gap, dans les communes de la Rochette, Romette, Gap, la Freyssinouse, la Roche-des-Arnauds, Manteyer, Pelleautier, Neffes, Sigoyer, la Bâtie-Neuve, la Bâtie-Vieille, Rambaud, Châteauvieux et Tallard, est concédé au sieur X***.

La durée de cette concession est fixée à cinquante ans.

ART. 2.

Le concessionnaire du Canal du Drac devra exécuter à ses frais, risques et périls, tous les travaux de construction du Canal principal, de tous les canaux secondaires nécessaires pour conduire l'eau à la limite de chaque propriété arrosable, et devra terminer lesdits travaux dans le délai de 7 ans, à partir du 1er janvier 1863.

Chaque propriétaire sera chargé de l'entretien de sa prise d'eau spéciale et de l'établissement des rigoles de distribution sur son propre terrain et devra pourvoir à l'écoulement des eaux de colature.

ART. 3.

Le Canal aura son origine au-dessous du confluent des deux branches du Drac, descendant d'Orcières et de Champoléon ; il passera dans le bassin de la Durance au moyen d'un souterrain sous le col de Manse et, à partir du point d'émergence, se partagera en divers embranchements, de façon à arroser le territoire des communes désignées dans le décret de concession, conformément aux indications générales figurées sur les plans sus-visés qui resteront annexés au présent décret.

ART. 4.

Le concesssionnaire devra soumettre à l'Administration supérieure, dans le délai d'un an, à dater du jour de la concession, le projet général et définitif tant du Canal principal que de ses divers embranchements.

Ce projet comprendra :

Un plan général à l'échelle d'un dix-millième, sur lequel sera indiqué le tracé des canaux que le concessionnaire devra établir, en exécution de l'article 1er ci-dessus,

Un profil en long, suivant l'axe de ces mêmes canaux,

Un certain nombre de profils en travers,

Le tableau des pentes,

Les dessins des principaux ouvrages d'art, notamment de la prise d'eau,

Enfin, un devis explicatif des ouvrages.

En cours d'exécution, le concessionnaire aura la faculté de proposer les modifications qu'il pourra juger utile d'introduire, mais ces modifications ne pourront être exécutées que moyennant l'approbation et le consentement formel de l'Administration supérieure.

ART. 5.

Le volume d'eau à dériver est fixé à quatre mètres cubes, au plus, par seconde, en temps d'étiage. Toutefois, le concessionnaire sera tenu de laisser dans le Drac une quantité d'eau telle que, réunie aux sources ou au produit des cours d'eau qui affluent au-dessous de la

prise, elle suffise aux usagers, ayant des droits antérieurs, lesquels devront, en cas d'insuffisance, être desservis par priorité.

ART. 6.

Les eaux non utilisées pour les irrigations, la salubrité ou les usines, seront rendues, en totalité, dans la rivière de la Luye, dans le torrent de Rousines, dans le petit Buëch ou dans les affluents de ces divers cours d'eau, à l'extrémité inférieure du territoire arrosable.

ART. 7.

Le concessionnaire devra construire et entretenir, à ses frais, des ponts dans tous les endroits où, par suite de ses travaux, les communications existantes se trouveraient interceptées.

Les largeurs de ces ponts, entre les parapets, seront fixées à 9 mètres au moins pour les routes impériales, à 6 mètres pour les routes départementales, à 5 mètres pour les chemins de grande communication, à 4 ou 3 mètres, suivant leur importance et leur largeur classée, pour les chemins de petite vicinalité, et, enfin, à 3 ou à 2 metres, suivant les besoins, pour les chemins ruraux et d'exploitation.

Ces ponts seront en bonne maçonnerie hydraulique.

ART. 8.

S'il y a lieu de déplacer des routes existantes, la déclivité des pentes et des rampes sur les nouvelles directions n'excédera pas $0^{m},03^{c}$ par mètre sur les routes impériales et départementales, $0^{m},06^{c}$, pour les chemins de grande communication, et $0^{m},08^{c}$, pour les autres chemins.

L'Administration restera libre toutefois d'apprécier les circonstances qui pourraient motiver une dérogation à la règle précédente.

ART. 9.

Les ponts à construire à la rencontre des routes impériales et départementales ne pourront être entrepris qu'en vertu de projets approuvés par l'Administration supérieure.

Le Préfet du département, sur l'avis de l'Ingénieur en chef des ponts et chaussées et après les enquêtes d'usage, pourra autoriser les déplacements des chemins vicinaux et la construction des ponts à la rencontre des chemins.

ART. 10.

Le concessionnaire sera tenu de rétablir et d'assurer, à ses frais, l'écoulement de toutes les eaux dont le cours serait arrêté, suspendu ou modifié par les travaux qu'il exécutera.

Les aqueducs, buses, ponts-canaux qui seront construits à cet effet, seront en maçonnerie hydraulique ou en fer.

Il sera tenu, en outre, de prendre les dispositions qui seront prescrites par l'Administration pour arrêter, autant que possible, les filtrations d'eau à travers le Canal et pour empêcher ces filtrations de nuire aux parties basses des territoires.

ART. 11.

Les barrages, déversoirs et prises d'eau du Canal seront également en maçonnerie hydraulique et en fer.

ART. 12.

A la rencontre des routes impériales ou départementales et autres chemins publics, le concessionnaire sera tenu de prendre toutes les mesures ou de payer tous les frais néces-

saires pour que les communications n'éprouvent ni interruption ni entrave pendant l'exécution des travaux. A cet effet, des routes et des ponts provisoires seront construits, par ses soins et à ses frais, partout où cela sera jugé nécessaire.

Avant que les communications existantes puissent être interceptées, les Ingénieurs devront reconnaître et constater si les travaux provisoires présentent une solidité suffisante et s'ils peuvent assurer le service de la circulation.

Un délai sera fixé pour la durée et l'exécution de ces travaux provisoires.

ART. 13.

Le concessionnaire pourra employer dans les travaux de maçonnerie dépendant de son entreprise les matériaux communément en usage dans les travaux publics de la localité. Toutefois, les têtes de voûte, les angles, socles, couronnement et extrémités des radiers, seront en pierre de taille.

ART. 14.

Tous les terrains destinés à servir d'emplacement au Canal et à ses dépendances, ainsi qu'au rétablissement des communications déplacées ou interrompues et des nouveaux lits des cours d'eau, seront achetés et payés par le concessionnaire.

ART. 15.

L'entreprise est déclarée d'utilité publique, et le concessionnaire est investi de tous les droits que les lois et règlements confèrent à l'Administration elle-même pour les travaux de l'État. Il pourra, en conséquence, se procurer, par les mêmes voies, des matériaux de remblais et d'empierrement nécessaires à la construction et à l'entretien du Canal et de ses dépendances. Il jouira, tant pour l'extraction que pour le transport et le dépôt des terres et des matériaux, des priviléges accordés par les mêmes lois et règlements aux entrepreneurs de travaux publics, à la charge par lui d'indemniser à l'amiable les propriétaires des terrains endommagés ou, en cas de non-accord, d'après les règlements accordés par le Conseil de Préfecture, sauf recours au Conseil d'État, sans que, dans aucun cas, ils puissent exercer de recours, à cet égard, contre l'Administration.

ART. 16.

Les indemnités pour occupations temporaires ou détérioration de terrains, pour chômage, modification ou destruction d'usines, pour tous dommages quelconques résultant des travaux, seront supportées et payées par le concessionnaire.

ART. 17.

Pendant la durée des travaux qu'il effectuera par des moyens et des agents de son choix, le concessionnaire sera soumis au contrôle et à la surveillance de l'Administration. Ce contrôle et cette surveillance auront pour objet d'empêcher le concessionnaire de s'écarter des dispositions qui lui sont prescrites par le présent décret.

ART. 18.

Après l'achèvement total des travaux, il sera procédé à leur réception par un ou plusieurs commissaires que l'Administration désignera. Le procès-verbal du ou des commissaires désignés ne sera valable qu'après l'homologation par l'Administration supérieure.

Le concessionnaire fera faire, en outre, à ses frais, un bornage contradictoire et un plan cadastral du Canal entier et de ses dépendances, depuis sa prise d'eau jusqu'à son extrémité aval. Il fera dresser également, à ses frais, et contradictoirement avec l'Administra-

tion, un état descriptif des ponts, aqueducs et autres ouvrages d'art qui pourront exister à cette époque sur tout le parcours du Canal et de ses dépendances.

Une expédition dûment certifiée des procès-verbaux de bornage du plan cadastral et de l'état descriptif sera déposée, aux frais du concessionnaire, dans les archives de l'Administration des ponts et chaussées.

Art. 19.

Le Canal et toutes ses dépendances seront constamment entretenus en bon état et de manière que l'écoulement des eaux soit toujours facile et sûr.

Le Canal devra, en outre, être constamment alimenté pendant la saison des arrosages, sans toutefois pouvoir dépasser, en temps d'étiage, le volume d'eau concédé, et en se conformant à la réserve exprimée à l'article 5 ci-dessus, d'au moins la quantité d'eau nécessaire aux irrigations des territoires que le Canal doit desservir, laquelle quantité sera calculée à raison de six cent quatre mètres cubes d'eau par hectare et par semaine. Dans le cas exceptionnellement rare où, vers la fin de la saison des arrosages, la dérivation possible ne permettrait pas de distribuer aux arrosants tout le volume déterminé ci-dessus, il serait fait entre eux une réduction proportionnelle, sans que pour cela le montant de la redevance à laquelle ils seront soumis en fût diminué.

Le Canal pourra être aussi constamment alimenté, en dehors de la saison d'arrosage, du volume d'eau nécessaire à la mise en jeu des usines qui seraient établies sur son cours, sans toutefois dépasser également, en temps d'étiage, le volume concédé.

L'état dudit Canal et de ses dépendances sera reconnu annuellement et plus souvent en cas d'urgence ou d'accident, par un ou plusieurs commissaires que désignera l'Administration.

Les frais d'entretien, d'alimentation et de réparation, soit ordinaires, soit extraordinaires, resteront entièrement à la charge du concessionnaire.

Pour ce qui concerne cet entretien, cette alimentation et ces réparations, le concessionnaire demeure soumis au contrôle et à la surveillance de l'Administration.

Si le Canal, une fois achevé, n'est pas constamment entretenu en bon état dans toute sa longueur, à partir de la prise d'eau, et suffisamment alimenté, il y sera pourvu d'office, à la diligence de l'Administration et aux frais du concessionnaire ou de ses ayants droit.

Art. 20.

Si, dans le délai d'un an, à dater du jour de l'approbation de la concession, le concessionnaire ne s'est pas mis en demeure de commencer les travaux qu'il est chargé d'exécuter et s'il ne les a pas effectivement commencés, il sera déchu de plein droit et sans qu'il y ait lieu à aucune mise en demeure ni notification quelconque, de tous les droits ou avantages qui lui sont conférés par le présent décret.

Art. 21.

Faute par le concessionnaire, une fois les travaux à sa charge commencés, de les avoir entièrement exécutés et terminés dans le délai fixé par l'article 1er, faute aussi par lui d'avoir rempli les diverses obligations qui lui sont imposées par le présent décret, il encourra la déchéance de tout le canal, à partir de la prise d'eau, et il sera pourvu à la continuation et à l'achèvement des travaux comme à l'exécution des autres engagements contractés par lui, et ce, au moyen d'une adjudication qu'on ouvrira sur les clauses du présent décret, qui servira de cahier des charges, et sur une mise à prix des ouvrages déjà exécutés, des matériaux approvisionnés et des portions du Canal déjà mises en exploitation.

Le concessionnaire évincé recevra du nouveau concessionnaire la valeur que la nouvelle adjudication aura déterminée.

La partie non encore restituée du cautionnement prescrit par l'article 39 ci-après deviendra la propriété de l'État.

Si l'adjudication ouverte n'amène aucun résultat, une seconde adjudication sera tentée sur les mêmes bases, après un délai de trois mois; si, cette seconde tentative restée également sans résultat, une troisième tentative n'aboutit pas, le concessionnaire sera définitivement déchu de tous droits à la concession du Canal et les portions du Canal déjà exécutées ou mises en exploitation deviendront immédiatement la propriété de l'État.

ART. 22.

En cas d'interruption partielle ou totale de l'exploitation du Canal, l'Administration prendra immédiatement, aux frais et risques du concessionnaire, les mesures nécessaires pour assurer le service.

Si, dans les trois mois de l'organisation du service provisoire, le concessionnaire n'a pas valablement justifié des moyens de prendre et de continuer l'exploitation, et s'il ne l'a pas effectivement reprise, la déchéance pourra être prononcée par le Ministre des Travaux publics.

Les dispositions des deux articles qui précèdent, ainsi que du présent article, ne seront point applicables au cas où le retard, ainsi que la cessation des travaux ou l'interruption de l'exploitation, proviendraient de force majeure régulièrement constatée.

ART. 23.

La contribution foncière sera établie en raison de la surface des terrains occupés par le Canal ou ses dépendances. La cote en sera calculée conformément à la loi du 25 avril 1803.

Les bâtiments et magasins dépendant de l'exploitation du Canal seront assimilés aux propriétés bâties dans la localité et le concessionnaire devra également payer toutes les contributions auxquelles ils pourront être soumis.

ART. 24.

Des règlements préfectoraux rendus après que le concessionnaire et les propriétaires auront été entendus détermineront les mesures et les dispositions nécessaires pour assurer l'emploi et la distribution des eaux, ainsi que la police et la conservation du Canal, dans toute son étendue, et des ouvrages qui en dépendent. Ces règlements devront être faits le plus tôt possible et avant le délai de trois ans fixé par l'art. 20, sans préjudice des règlements ultérieurs qui pourront être reconnus nécessaires.

ART. 25.

Le concessionnaire aura le droit de se servir des eaux du Canal et d'en tirer profit pour la mise en jeu des usines qui seront établies sur son cours, à charge par lui de se conformer aux lois et aux règlements sur la police des cours d'eau et de satisfaire avant tout aux besoins de l'irrigation.

ART. 26.

Pour indemniser le concessionnaire des travaux et des dépenses qu'il s'engage à faire, l'autorisation lui est accordée, pour la durée de cette concession, de percevoir des propriétaires qui voudront arroser une taxe annuelle de 23 fr. par hectare pour les propriétaires qui auront souscrit avant la promulgation du présent décret, et de 34 fr. 50 c. pour tous les arrosants qui s'engageront après la délivrance de la concession.

Les premiers souscripteurs qui voudront par la suite augmenter l'étendue de leurs arrosages seront soumis aux mêmes conditions que les non-souscripteurs, pour toute l'étendue dépassant celle de leur souscription primitive.

ART. 27.

La redevance annuelle commencera à courir dès la première année où les eaux auront

été introduites utilement dans les canaux par le concessionnaire et amenées sur la limite de la propriété de l'arrosant.

Elle sera soumise aux réserves exprimées dans l'article suivant, exigible par douzièmes et par mois comme les contributions publiques, d'après un ou plusieurs rôles approuvés par le Préfet. Les frais de rédaction et de perception de ces rôles, ainsi que ceux de poursuites, seront, conformément aux engagements des souscripteurs, à la charge des arrosants intéressés.

Art. 28.

A l'époque fixée pour l'expiration de la présente concession et par le fait seul de cette expiration, les arrosants, réunis en association syndicale générale, seront subrogés à tous les droits et à toutes les obligations du concessionnaire dans la propriété des terrains et des ouvrages désignés au plan cadastral mentionné dans l'article 18.

Ils entreront immédiatement en jouissance du Canal entier, de toutes ses dépendances et de tous ses produits, à l'exception des usines établies sur ce canal, lesquelles continueront à rester la propriété de ceux qui les posséderont et à jouir des eaux dudit canal conformément à leurs titres.

Le concessionnaire sera tenu de mettre en bon état d'entretien le Canal, les ouvrages qui le composent et toutes les dépendances, y compris les maisons de garde, les bureaux de perception et, en général, tous les objets immobiliers servant à l'exploitation du Canal.

Dans les cinq dernières années qui précéderont le terme de la concession, le Gouvernement, pour la Société des arrosants, aura le droit de mettre saisie-arrêt sur les revenus du Canal et de les employer à rétablir en bon état le Canal et toutes ses dépendances, si le concessionnaire ne se mettait pas en mesure de satisfaire pleinement et entièrement à cette obligation.

Quant aux objets mobiliers, tels que machines, outils, chariots, voitures, matériaux et approvisionnements de tous genres, la Société des arrosants sera tenue de les prendre, à dire d'expert, si le concessionnaire le requiert, et réciproquement, si la Société le requiert, le concessionnaire sera tenu également de les céder à dire d'expert.

Art. 29.

Dans le cas où, la concession expirée, il resterait disponible dans le Canal une portion du volume d'eau concédé, la Société des arrosants serait tenue de la délivrer, sans préférence, aux propriétaires qui lui en feraient la demande, à raison de six cent quatre mètres cubes par hectare et par semaine ; ces propriétaires seraient admis dans la Société aux mêmes conditions que les anciens souscripteurs, et le montant de leur cotisation par hectare et par an serait réglé en capital par le syndicat, sauf l'approbation du Préfet, tous les cinq ans ou plus souvent, si cela est jugé nécessaire.

Art. 30.

Dans les cas où le Gouvernement ordonnerait ou autoriserait la construction de routes impériales, départementales ou vicinales, de canaux ou de chemins de fer, qui traverseraient le Canal du Drac, la compagnie concessionnaire ne pourra mettre aucun obstacle à ces travaux ; mais toutes les dispositions seront prises pour qu'il n'en résulte aucun obstacle à la construction ou au service dudit Canal, ni aucuns frais pour les concessionnaires.

Art. 31.

Pour l'exécution des travaux, le concessionnaire se soumettra aux décisions ministérielles concernant l'interdiction du travail les dimanches et jours fériés.

ART. 32.

Les agents et gardes que le concessionnaire établira, soit pour opérer la perception des droits, soit pour la surveillance ou la police du Canal et des ouvrages qui en dépendent, pourront être assermentés et seront, dans ce cas, assimilés aux gardes champêtres.

ART. 33.

Le concessionnaire devra faire élection de domicile à Gap. Dans le cas de non-élection de domicile, toute notification ou signification à lui adressée sera valable lorsqu'elle sera faite au secrétariat général de la préfecture des Hautes-Alpes.

ART. 34.

Les contestations qui s'élèveraient entre les concessionnaires et l'Administration au sujet de l'exécution ou de l'interprétation des clauses du présent cahier des charges seront jugées administrativement par le Conseil de préfecture du département des Hautes-Alpes, sauf recours au Conseil d'Etat.

ART. 35.

Le cautionnement de l'entreprise est fixé à soixante-quinze mille francs. Il sera versé dans les caisses du receveur général des Hautes-Alpes, la première moitié avant la signature du décret, et la seconde moitié après. Ce versement sera opéré, soit en numéraire, soit en rentes sur l'Etat, calculées conformément à l'ordonnance du 19 janvier 1825, soit en bons du Trésor ou autres effets publics, avec transfert, au profit de la Caisse des dépôts et consignations, de celles de ces valeurs qui seraient nominatives ou à ordre.

Ledit cautionnement sera rendu au concessionnaire par cinquième et proportionnellement à l'avancement des travaux.

ART. 36.

Les frais de contrôle et de réception des travaux seront supportés par le concessionnaire, d'après les règlements qui en seront faits conformément au décret du 10 mai 1854.

Exécution du canal. Difficultés rencontrées. — Le décret de concession obtenu, les travaux commencèrent bientôt, et on ne tarda pas à reconnaître qu'ils seraient plus difficiles et plus coûteux que le projet ne l'avait supposé.

On rencontra, sur certains points du canal, des terres graveleuses et un sol très-perméable qui nécessitait d'importants travaux pour rendre le canal étanche et prévenir les pertes d'eau. Où l'on avait prévu des déblais de terre ou de roches tendres, on rencontra des terres mêlées de pierres et de blocs de rochers, ou des rochers quartzeux excessivement durs.

Les déclivités considérables des versants rendaient très-pénible l'établissement des tranchées à flanc de coteau; les éboulements augmentaient outre mesure le cube des déblais, qui fut bien supérieur aux quantités prévues.

Le souterrain du col de Manse, qui ne devait être maçonné que sur 150 mètres à partir des têtes, dut recevoir un revêtement en maçonnerie sur toute sa longueur; les parois se délitaient et s'exfoliaient sous les influences atmosphériques, et n'auraient point résisté au courant. Il a fallu boiser les puits d'une manière énergique.

En quelques parties, on rencontra des terrains argileux et mobiles dont la consolidation a exigé des dépenses assez élevées.

Les fondations des ouvrages d'art coûtèrent plus cher qu'on ne l'avait sup-

posé; l'établissement de la prise d'eau occasionna une dépense égale au double de la somme prévue. Les indemnités de terrain dépassèrent aussi les prévisions.

Dès 1867, M. l'ingénieur en chef Gentil montrait que la dépense dépasserait 2,250,000 francs; c'est une augmentation de moitié sur la dépense calculée. Le tunnel seul revenait alors à plus de 230 francs le mètre courant.

On voit que l'affaire se présentait sous le plus mauvais jour, et que les redevances futures (23 francs l'hectare) ne pouvaient suffire à payer même l'intérêt des dépenses faites, non compris les avances de fonds et les frais d'administration et d'entretien.

La concession se traîna péniblement jusqu'en 1873, et alors, en présence de l'impossibilité pour les concessionnaires de continuer les travaux, le canal fut placé sous le séquestre par un décret du 18 juillet 1873, dont voici le texte :

Le Président de la République française,

Sur le rapport du Ministre des travaux publics,

Vu le décret du 11 avril 1863, relatif à la concession du Canal du Drac, destiné à l'irrigation du bassin de Gap (Hautes-Alpes);

Vu la lettre du 19 novembre 1872, par laquelle le Préfet des Hautes-Alpes fait connaître que les combinaisons destinées à assurer la reprise des travaux et l'achèvement de l'entreprise ne paraissent plus avoir aucune chance de réalisation et demande que le Canal soit placé sous le séquestre administratif;

Vu la lettre en date du 6 juin 1873, par laquelle le concessionnaire accepte la mise sous séquestre ;

Considérant que le concessionnaire se trouve, quant à présent, à raison de sa situation financière, dans l'impossibilité d'assurer l'entretien des ouvrages déjà exécutés et de terminer les travaux restant à achever;

Considérant que le Canal du Drac a été concédé dans un intérêt public, pour arroser les territoires de quatorze communes, dans le bassin de Gap ; qu'il est du droit et du devoir du Gouvernement d'en assurer la conservation, et que la mesure la plus efficace à prendre à cet effet est de placer le Canal sous le séquestre en réservant tous les droits des tiers ;

Considérant que cette mesure est urgente,

DÉCRÈTE :

ARTICLE 1er.

Le Canal du Drac est placé sous séquestre.

Il sera entretenu sous la direction du Ministre des travaux publics, lequel pourvoira en outre à la continuation et à l'achèvement dudit Canal.

ART. 2.

M. de Tournadre, ingénieur en chef des ponts et chaussées, est nommé administrateur du séquestre.

ART. 3.

Il sera procédé immédiatement d'une part, par un inspecteur général des ponts et chaussées, à la constatation des travaux du Canal au jour de l'établissement du séquestre, et, d'autre part, par un inspecteur des finances, à la constatation de la situation financière de l'entreprise.

ART. 4.

Tous les produits directs ou indirects du Canal seront perçus par l'Administration du

séquestre, nonobstant toutes oppositions ou saisies-arrêts, sauf remise au concessionnaire ou à ses ayants droit de la partie de ces produits qui resterait disponible après avoir pourvu aux frais d'entretien et d'exploitation du Canal.

ART. 5.

Les droits et les intérêts des tiers sont et demeurent formellement réservés.

ART. 6.

Le ministre des travaux publics est chargé de l'exécution du présent décret, lequel sera inséré au *Bulletin des Lois*.

Fait à Versailles, le 18 juillet 1873.

Signé : Maréchal de MAC-MAHON.

État actuel du canal. — D'après les renseignements qu'ont bien voulu nous donner M. l'ingénieur en chef Fargue, administrateur actuel du séquestre, et M. l'ingénieur Mauris, chargé de l'achèvement des travaux, voici quelle est la situation :

Il a fallu procéder à la réfection du tunnel de Manse, qui n'aurait pu résister, et qui se serait effondré, à la reconstruction d'un certain nombre de ponts et d'aqueducs qui tombaient d'eux-mêmes, à la construction de perrés, de murs de soutènement et de cuvettes maçonnées. En deux endroits, on a déplacé l'axe du canal et on a changé le tracé à ciel ouvert en un passage en galerie à travers les coteaux. A la fin de 1875, une somme de 700,000 francs a déjà été dépensée par l'administration du séquestre. Au commencement du mois d'août 1874, l'eau a été mise dans la branche-mère. On a même fait quelques essais d'arrosage dans le bassin de Gap; mais cela n'a pas duré longtemps. Des éboulements de coteaux se sont manifestés, et il a fallu interrompre la mise en eau pour faire des travaux de consolidation et d'étanchement de la cuvette.

Dans le courant de l'été de 1876, les essais de mise en eau seront poursuivis sur une plus grande échelle. La branche principale, dite de la Rochette, fonctionnera sur presque toute son étendue; celle dite de Charance conduira l'eau jusqu'à près de 10 kilomètres. Mais il faudra s'attendre à de nouveaux accidents causés par l'extrême perméabilité de certaines parties de la cuvette, et par l'instabilité de l'équilibre de certains flancs de montagne.

En somme, on arrivera à surmonter les difficultés, mais on aura doublé la dépense prévue; et, au point de vue de l'entreprise proprement dite, l'affaire sera des plus mauvaises.

Conclusion. — Cette étude du canal d'irrigation du bassin de Gap est fort intéressante à plus d'un titre :

Elle montre d'abord que dans les projets de ce genre il ne faut pas s'attacher à réduire les prévisions de dépense; il est toujours facile, sur le papier, et en ne tenant compte que des calculs théoriques, il est toujours facile de réaliser des économies; mais, dans la pratique, ces économies disparaissent bien souvent par suite de causes locales et accidentelles. Mieux vaut se tenir au large dans toutes les évaluations, car il arrivera presque toujours qu'elles seront néanmoins dépassées.

Un projet de canal ne peut être sérieusement rédigé que si l'on se rend d'abord un compte exact et détaillé de la constitution physique et géologique du sol. On évite par là des fautes analogues à celle qui consiste à prévoir une cuvette

sans revêtement dans un terrain d'une excessive perméabilité, et à prévoir aussi des vitesses d'écoulement considérables sur un sol que la moindre pluie ravine et dégrade profondément.

Les grands canaux d'irrigation doivent être exécutés par l'État. — Enfin, la conclusion principale à tirer de cette étude est que les grands canaux d'irrigation doivent être exécutés directement par l'État. Ces travaux présentent trop d'aléa pour être laissés à la charge des propriétaires intéressés ou d'une compagnie concessionnaire. On ne pourra jamais accorder à une compagnie concessionnaire des redevances assez fortes pour qu'elle arrive à amortir son capital de premier établissement et à faire les frais d'entretien. L'entreprise pourra être ruineuse pour la compagnie, tout en étant fructueuse pour l'intérêt général, tout en ayant les caractères d'une œuvre de véritable utilité publique. Au moyen de l'exécution par l'État, ces mécomptes ne sont pas à craindre : on est sûr que les travaux sont bien et rapidement exécutés, et, si les prévisions de dépenses sont dépassées, personne n'y perd, puisque c'est l'État qui est le premier appelé à recueillir les bénéfices de l'accroissement de la fortune publique.

Le principe de l'exécution des grands canaux d'irrigation par l'État, qui en concède ensuite l'exploitation soit à une compagnie, soit aux propriétaires réunis en association syndicale, nous paraît donc le meilleur à tous égards.

8° Canal dérivé du Verdon, pour l'alimentation de la ville d'Aix et l'irrigation des communes voisines

Description générale. — Le canal dérivé du Verdon, pour l'alimentation de la ville d'Aix et pour l'irrigation des communes voisines, a été concédé à la ville d'Aix, qui l'a rétrocédé à la Compagnie générale des canaux et travaux publics. M. de Tournadre, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a commencé les travaux et a construit en particulier le barrage de prise d'eau qu'il a décrit dans un mémoire inséré aux *Annales des ponts et chaussées* de 1872. Les travaux ont été terminés et menés à bonne fin par notre excellent camarade et ami, M. Bricka, ingénieur des ponts et chaussées. M. Bricka se propose de donner bientôt une description complète du canal et des dificultés qu'en a présentées l'exécution ; aussi n'en ferons-nous ici qu'une description sommaire.

Un décret du 20 mai 1863 a concédé à perpétuité à la ville d'Aix, en Provence, le droit de dériver de la rivière du Verdon un des principaux affluents de la Durance, un volume de 6 mètres cubes par seconde pour le service des irrigations, l'alimentation des habitants et les besoins de l'industrie.

« Le Verdon, dit M. de Tournadre, se jette dans la Durance à 10 kilomètres environ à l'amont du défilé de Mirabeau ; il a sa source dans les versants élevés des Alpes, et est un des plus forts affluents de la Durance. Sa pente, à partir d'Aiguines, est de $0^m,003$ par mètre ; son débit, qui se réduit à 10 mètres cubes par seconde en étiage, s'élève à 1,200 mètres cubes dans les grandes crues. Les eaux sont généralement limpides, cependant elles charrient encore beaucoup de limon pendant les crues, et le relevé des observations faites depuis dix ans accuse environ quatre-ving-dix jours de troubles par année.

Le lit de la rivière se trouve fréquemment encaissé entre des roches calcaires taillées à pic sur des hauteurs de 50 à 60 mètres, et c'est à l'extrémité infé-

rieure d'une de ces gorges profondes, près du village de Quinson, dans le département des Basses-Alpes, que le canal du Verdon dérive les eaux nécessaires à son alimentation. Ce défilé se prolonge à l'amont sur 12 kilomètres de développement dans les mêmes conditions; et, pour y atteindre le niveau nécessaire à la prise, soit 372^m,50 au-dessus de la mer, il eût fallu entailler le canal dans ces flancs presque verticaux sur un parcours de 4 à 5 kilomètres, au prix de dépenses et de difficultés considérables. Nous décidâmes, en conséquence, d'amener le canal vers la sortie de ces gorges en relevant la rivière au niveau voulu, et fûmes ainsi conduit à adopter un barrage de 12 mètres de hauteur au-dessus du lit existant. »

Nous décrirons ce barrage dans le chapitre spécial que nous consacrerons aux travaux de ce genre.

L'ensemble du réseau qui forme le canal d'Aix comprend :

1° Une branche-mère de 82 kilomètres de longueur,
2° Des branches secondaires sur 150 kilomètres,
3° Des rigoles de distribution d'une longueur totale de 550 kilomètres.

Si nous descendons la branche-mère en partant du barrage de Quinson, nous rencontrons successivement les ouvrages ci-après :

1. Pont-aqueduc de Beaurivet, de 95 mètres de longueur, dix arches.

2. Le canal suit ensuite les gorges escarpées du Verdon, dans lesquelles il a été difficile de lui ménager un lit; tantôt il s'enfonce à flanc de coteau en galerie souterraine, tantôt il coule à ciel ouvert dans une cuvette maçonnée, tantôt il est entaillé dans les rochers qui le surplombent.

3. A la sortie des gorges, on ne tarde pas à rencontrer le souterrain de Maurras, de 4,120 mètres de longueur.

4. Sur 5 kilomètres à la suite, le canal suit le vallon de Malouric, le franchit par un pont-aqueduc de 15 mètres de longueur et pénètre dans le souterrain de Ginasservis.

5. Le souterrain de Ginasservis, percé dans un faîte secondaire, a 5,150 mètres de long.

6. Le canal est ensuite creusé à ciel ouvert jusqu'au vallon de Saint-Paul qu'il franchit à l'aide d'un siphon formé d'un seul tuyau de tôle de grand diamètre.

7. Après le vallon de Saint-Paul, on rencontre le petit souterrain de Rians de 425 mètres de long; à la suite de ce souterrain jusqu'à Meyrargues, la branche-mère se développe à flanc de coteau; elle coupe par des galeries souterraines les contreforts qu'elle rencontre et traverse au moyen de siphons les vallons correspondants.

8. A la hauteur de Meyrargues, le canal entre dans le souterrain de Pierre-Fiche dont la longueur est de 3,040 mètres.

9. Vient ensuite sur le ravin de Parouvière un pont-aqueduc de 120 mètres de long et de 20 mètres de hauteur.

10. Après un certain parcours à ciel ouvert, le canal traverse encore le souterrain de Saint-Hippolyte (950 mètres de long) et la branche-mère se trouve alors dans le bassin d'Aix, tributaire de l'étang de Berre; cette branche-mère verse ses eaux dans un bassin de répartition qui alimente les diverses branches de dérivation.

Comme nous l'avons dit, la longueur de la branche-mère est de 82 kilomètres

et la différence de l'altitude entre la prise d'eau et le niveau du bassin de répartition est de 40 mètres. C'est une pente moyenne de 0m,50 par kilomètre. En réalité la pente est variable avec les sections ; ainsi que nous l'avons déjà vu au canal d'irrigation du bassin de Gap, on adopte dans les parties faciles à ciel ouvert des pentes faibles et de grandes sections, tandis qu'on rétrécit les sections en augmentant la pente dans les parties rocheuses et escarpées, et surtout dans les souterrains.

Aussi les pentes de la branche-mère du canal du Verdon varient-elles de 0m,0002 à 0m,0011 par mètre courant. Dans les parties en rocher, la pente est de 0m,0008 ; dans les souterrains elle varie de 0m,0008 à 0m,0011.

La profondeur d'eau varie de 1m,50 à 2 mètres; cette dernière profondeur est adoptée dans les souterrains afin de réduire la largeur et par suite la difficulté d'exécution.

A ciel ouvert, le tirant d'eau est de 1m,50; la largeur au plafond et la largeur en gueule sont évidemment variables avec la pente, leurs valeurs maxima atteignent 3 mètres et 8m,50. Pour maintenir toutes les sections étanches, il a fallu exécuter une cuvette maçonnée sur près de 21 kilomètres. Le travail d'art le plus nouveau, le plus hardi et le plus intéressant du canal, est le grand siphon en tôle du vallon de Saint-Paul. L'administration avait d'abord demandé un siphon double, mais, en exécution, M. Bricka n'a posé qu'un seul tuyau de grand diamètre : il a mis à notre disposition les dessins du projet de double siphon, c'est celui-là que représentent les planches XXIII et XXIV, bien qu'il n'ait pas été exécuté ; mais il ne diffère du siphon réel que par les dimensions, les dispositions sont restées les mêmes. La description suivante, extraite du rapport de M. Bricka, s'applique au siphon simple.

Siphon en tôle du vallon de Saint-Paul. — Lors de la construction du canal du Verdon, on établit pour la traversée du vallon de Saint-Paul un siphon souterrain passant à 25 mètres au-dessous de la vallée et dont le rocher revêtu de maçonnerie formait la paroi résistante. A la première mise en charge de cet ouvrage dont la pression s'élevait à 6 atmosphères, une dislocation se produisit sur une longueur de 20 mètres environ. Après une longue et coûteuse réparation, une nouvelle rupture eut lieu au même point le 20 mai 1874. L'aspect des autres parties du siphon restées intactes et l'expérience d'ouvrages analogues qui fonctionnent dans des conditions satisfaisantes semblent indiquer que ces deux accidents ont été produits surtout par les défauts de construction, et qu'une réparation définitive ne serait pas impossible si on franchissait la partie disloquée au moyen de tuyaux en fonte. Mais ce travail eût coûté environ 50,000 francs, on ne pouvait répondre du succès définitif, et le capital considérable engagé dans l'entreprise restait improductif jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Pour ces raisons, la Compagnie résolut d'abandonner l'ancien siphon en maçonnerie et de le remplacer par un ouvrage entièrement neuf.

Un pont-aqueduc en maçonnerie eût coûté 400,000 francs, une des piles devant avoir une hauteur de 42 mètres au-dessous des naissances ; la construction exigeait deux ans, et cette dernière considération suffisait seule à faire repousser le projet.

Un siphon en fonte à un tuyau eût coûté au moins 310,000 francs, et un siphon en fonte à deux tuyaux 500,000 francs. Les tuyaux eussent dû être formés d'éléments très-courts (1m,50 dans le premier cas, 2m,25 dans le second), reliés par des brides ; nous ne connaissons aucun exemple d'ouvrages établis dans ces conditions, et les constructeurs les plus sérieux, consultés à ce sujet, parais-

saient peu disposés à se charger de cette entreprise qu'ils considéraient comme offrant de très-grandes difficultés.

Pour avoir des dimensions d'un emploi courant, il fallait réduire à 1 mètre le diamètre des siphons et adopter six tuyaux dont le prix se fût élevé au moins à 550,000 francs.

La durée de la construction d'un siphon en fonte ne pouvait être de moins de huit mois.

Un siphon en tôle à un seul tuyau, de $2^m,30$ de diamètre, pouvait être établi dans les meilleures conditions de solidité pour 190,000 francs au plus, sans aucune difficulté de construction; l'absence de joints, la simplicité des supports, l'étendue et l'uniformité des surfaces vues en rendaient la visite et l'entretien très-faciles.

Enfin les ouvrages de cette nature avaient déjà reçu la sanction de l'expérience : il existe sur le canal du Verdon un siphon en tôle de $2^m,30$ de diamètre et 130 mètres de longueur qui fonctionne depuis 1867 dans les conditions les plus satisfaisantes; le service des eaux de Paris a fait établir, pour la traversée de l'Orge par le canal de la Vanne, un siphon en tôle de $1^m,40$ de diamètre qui franchit d'une seule portée une ouverture de 16 mètres sous une charge de 45 mètres d'eau.

La durée d'exécution d'un siphon en tôle ne devait pas dépasser quatre mois.

Ces considérations d'économie, de facilité d'installation, de sécurité et de rapidité, ont décidé la Compagnie du canal du Verdon à adopter un siphon unique en tôle pour le passage du vallon de Saint-Paul.

Ce siphon, établi perpendiculairement à l'axe de la vallée, à 20 mètres au delà de celui qu'il doit remplacer, est formé d'un seul tuyau en tôle de $2^m,30$ de diamètre encastré à ses deux extrémités dans des tours en maçonnerie.

La partie médiane est horizontale et raccordée avec les tours par des parties inclinées suivant des pentes de 0,385 et de 0,364. Aux deux angles formés par la rencontre des parties inclinées et de la partie horizontale, le tuyau est supporté par des appuis fixes : sur le reste de sa longueur, il repose par l'intermédiaire de rouleaux en fonte sur des dés en pierre de taille et des appareils de dilatation de forme spéciale lui permettent de s'allonger et de se raccourcir sous l'influence de la température.

Le tuyau est formé de feuilles de tôle dont l'épaisseur est de $0^m,01$ sur $148^m,63$ et de $0^m,008$ sur le reste de la longueur.

Le travail dû à la pression intérieure reste au-dessous de $3^k,9$ par millimètre carré, et le travail dû à la flexion reste au-dessous de $1^k,825$. La somme de ces deux efforts réunis qui, du reste, sont perpendiculaires l'un à l'autre, ne dépasse nulle part 5 kilogrammes.

Avec des tôles d'une épaisseur supérieure à $0^m,006$, les ravages de l'oxydation sont moins à craindre et peuvent être plus facilement conjurés.

Les feuilles de tôle, d'une longueur égale à la moitié de la circonférence, sont réunies entre elles, dans le sens de la longueur du tuyau, par une rivure à clain et dans le sens transversal par des couvre-joints : on a évité par là toute irrégularité de section pouvant s'opposer au mouvement de l'eau à la rencontre des joints, l'étanchéité est assurée en étirant une des feuilles de tôle pour la pincer entre les deux autres.

Les tôles de 10 millimètres sont réunies par des rivets de 18 millimètres de diamètre et celles de 8 par des rivets de 16 : les rivets sont espacés entre eux de $0^m,05$ d'axe en axe, et leur bord extérieur est à $0^m,025$ du bord de la tôle. Ces

dispositions, différentes de celles qu'on rencontre d'ordinaire dans la construction des ponts, ont pour but de permettre le matage des joints nécessaire à l'étanchéité.

Les coudes sont formés de feuilles de tôle embouties; comme elles reçoivent des efforts obliques, on leur a donné de la roideur en doublant la largeur des couvre-joints et le nombre des rivets.

Les supports d'angle sont entièrement fixes et doivent s'opposer à la fois à l'effort exercé par la partie inclinée qui tend à descendre et aux efforts produits par la dilatation.

Les conditions d'équilibre étant différentes lorsque le siphon est plein d'eau et lorsqu'il est vide, on a établi les supports en vue du cas normal où le siphon sera en charge, et une disposition additionnelle en assure la stabilité dans le cas où il sera vide.

Lorsque le siphon est en charge, le support reçoit à la fois le poids des deux demi-travées qui le touchent et la composante parallèle au terrain du poids du tuyau incliné (on néglige les efforts dus à la dilatation qui varieront suivant la sensibilité des appareils de dilatation et qui, du reste, ne pourront jamais modifier d'une manière inquiétante la grandeur et la direction de la résultante). La chaise sur laquelle repose le tuyau est formée de deux feuilles de tôle roidies par des fers à T, contre-ventées par des cornières et des goussets et reposant, par l'intermédiaire de patins en fonte, sur un lit de pierres de taille perpendiculaires à la résultante des forces (planche XXIV).

Lorsque le tuyau est vide, le poids des deux demi-travées adjacentes au support est diminué de tout le poids de l'eau, soit des $\frac{8}{10}$ de sa valeur, tandis que la composante parallèle au terrain reste la même. La résultante s'éloigne alors tellement de la verticale que le tuyau serait entraîné, malgré l'obliquité de la surface d'appui. On s'oppose à cet effet au moyen de deux oreilles rivées sur le tuyau d'un bout et s'appuyant d'autre bout, par l'intermédiaire de patins en fonte, sur les culées de deux ponts construits pour le passage des chemins.

Les supports intermédiaires, assemblés sur le tuyau au moyen de cornières, et destinés à recevoir seulement le poids du tuyau, sont formés de deux lames de tôle roidies par des cornières et par un gousset de contre-ventement et reposant, par l'intermédiaire d'un chariot de friction, sur des dés en pierres de taille.

Sur les parties inclinées, les chariots de dilatation tendent à s'échapper suivant la pente, et il faut les retenir sans entraver leur mouvement. On y arrive au moyen d'un levier en fer fixé par une charnière au patin en fonte inférieur, et rattaché au chariot ainsi qu'au patin supérieur par deux œils de forme allongée embrassant des goupilles en fer.

La goupille centrale, celle du chariot, étant au milieu du levier, le chariot qu'elle entraîne avec elle parcourra toujours exactement, lorsque le patin supérieur se déplacera, c'est-à-dire lorsque le tuyau lui-même se déplacera, la moitié du chemin parcouru par celui-ci : le chariot se trouvera donc dans la position qu'il doit occuper si le roulement s'effectue régulièrement.

Les supports sont tous également espacés, sauf ceux qui comprennent entre eux les appareils de dilatation; la distance de ces derniers a été calculée de telle façon que les moments fléchissants extrêmes soient égaux à ceux des autres travées. Le tuyau peut donc être considéré comme encastré sur tous ses appuis. L'espace compris entre chacune des tours et le support le plus voisin a été calculé de telle façon que la collerette en fonte, qui forme l'embase du tuyau, n'ait à supporter aucun effort tranchant.

Les parties de tuyaux comprises entre deux points fixes doivent pouvoir s'allonger et se raccourcir pour obéir aux effets de la dilatation. On arrive à ce résultat au moyen d'un renflement en forme de soufflet dans lequel le mouvement est produit par la flexion de la tôle. Des appareils identiques existent sur le siphon déjà construit sur le canal du Verdon et fonctionnent de la manière la plus satisfaisante.

Les soufflets sont au nombre de trois : un au milieu de la partie centrale et deux aux extrémités supérieures des parties inclinées. On a placé ceux-ci le plus près possible des tours pour diminuer les efforts de traction qui s'exercent sur les maçonneries. C'est dans le même but qu'on y a réduit l'épaisseur de la tôle à 6 millimètres, de manière à augmenter leur flexibilité.

Les dimensions des tours en maçonnerie ont été calculées comme celles des murs de réservoirs, sans tenir aucun compte de la cohésion des mortiers. Le pied des tours a été solidement encastré dans le rocher.

Le raccordement du tuyau en tôle avec les tours se fait au moyen de tuyaux en fonte noyés dans le béton; ces tuyaux sont à brides intérieures, ce qui permet de visiter et de changer les boulons. Ils sont assemblés, sur la face extérieure de la tour, à une collerette en fonte munie de nervures sur laquelle sont rivées directement les tôles du tuyau.

Un robinet de $0^{m},60$ de diamètre permet d'opérer la vidange du siphon dans le ruisseau des Carmes, et un trou d'homme permet l'accès de la partie horizontale; des escaliers en fer établis dans les puits des tours et une lisse en fer établie à l'intérieur des parties inclinées du siphon permettent de les visiter facilement.

Nous n'entrerons point dans le détail des calculs; les efforts dus à la pression de l'eau se calculent comme pour une chaudière à vapeur ou un tuyau de conduite, ainsi que nous l'avons expliqué dans deux autres parties de notre *Manuel;* les efforts dus à la flexion se calculent par les formules relatives à la résistance des poutres droites encastrées sur leurs appuis et supportant une charge uniformément répartie. Nous avons indiqué plus haut la manière de construire la résultante des pressions qui s'exercent sur les supports d'angles. Il n'y a là rien de difficile.

On trouvera, du reste, tous ces calculs ainsi que les détails de l'opération, dans le mémoire que M. Bricka se propose de publier bientôt. Les dessins de nos planches 23 et 24 se rapportent au projet d'un double siphon formé de deux tuyaux de $1^{m},75$ de diamètre. C'est le siphon unique de $2^{m},30$ de diamètre qui a été exécuté et qui a réussi.

Il a exigé beaucoup moins de temps pour l'exécution et a présenté beaucoup moins de difficultés qu'un siphon double. Ce dernier eût coûté 263,000 francs au lieu de 190,000; il entraînait donc une dépense supplémentaire de 73,000 francs; avec le siphon double, on était conduit à employer des tôles de $0^{m},006$ susceptibles de se voiler et de s'oxyder facilement.

Donc, moins de sécurité; il est vrai qu'en cas d'accident à un tuyau, l'autre restait pour le service. A cela on a répondu que les réparations d'un tuyau en tôle n'exigeaient pas beaucoup de temps, et qu'il y avait dans le canal des parties beaucoup plus dangereuses, telles que des souterrains et des remblais.

Dépense de construction du canal. — Dans le projet primitif, la dépense nécessaire à la construction du canal du Verdon avait été évaluée à 8,775,000 francs.

Cette dépense a, paraît-il, été plus que doublée : aussi l'affaire ne semble-t-elle

pas devoir donner les produits qu'on pouvait espérer, bien qu'elle doive réaliser un accroissement sérieux de la fortune publique.

Ce fait vient à l'appui de ce que nous disions en parlant du canal de Gap; l'exécution des travaux de ce genre doit être réservée à l'État, qui a les moyens de les bien faire et de supporter tous les mécomptes, et qui, en somme, trouve indirectement de sérieux profits dans les grandes entreprises d'intérêt général.

4° Des Irrigations en Espagne

Lorsqu'il s'est agi de développer en Algérie le système des irrigations, M. Aymard, ingénieur des ponts et chaussées, reçut la mission de se rendre en Espagne pour étudier les procédés d'arrosage usités dans ce pays. Il a consigné ses observations dans un ouvrage fort intéressant, dont nous nous contenterons de relever ici les points les plus saillants[1].

Irrigations de Valence. — Les irrigations de Valence se font au moyen de canaux dérivés du Turia ou Guadalaviar. Ces irrigations ont produit la huerta, le jardin de Valence, arrosé par huit prises d'eau, réparties en nombre égal sur chaque côté du fleuve. La première est à 11 kilomètres en amont de Valence, à 14 kilomètres environ en amont du port d'El-Grao; la dernière est à 3 kilomètres en amont de Valence.

Les prises d'eau sont assurées au moyen de barrages en maçonnerie, ou plutôt de seuils qui pénètrent à quelques mètres au-dessous du lit de la rivière et n'ont, par rapport à lui, qu'une faible saillie. La pente de leur couronnement est très-faible, et les parements sont revêtus de fortes pierres de taille reliées par des crampons de fer.

Ces barrages, qui datent des Maures, ne déterminent point d'affouillements sérieux, même à l'époque des plus fortes crues. On leur accole un pertuis fermé par des vannes ou des poutrelles horizontales; ce pertuis sert au passage des crues et surtout au flottage.

La figure 3, planche XIV, représente la prise d'eau du canal de Moncade, et la figure 5, celle du canal de Cuart; le couronnement de l'un est un plan incliné, celui de l'autre est un escalier. En A est le pertuis dont nous venons de parler, et en B est un petit bâtiment qui abrite les vannes d'alimentation du canal.

Le débit du fleuve étant représenté par 138 parties, un certain nombre de parties est attribué à chacun des huit canaux, et les orifices sont installés de telle sorte, que la répartition se fait suivant la proportion voulue. C'est sans doute par tâtonnement que les Maures sont arrivés à ce résultat.

« Nous avons vu que partout les répartitions sont faites, dit M. Aymard, non par volumes fixes, mais par parties aliquotes du débit. D'ailleurs, n'est-ce pas là une idée simple et rationnelle? Avec le système de la proportionnalité, chacun jouit de l'abondance des eaux ou souffre de la sécheresse, au prorata des intérêts qu'il a engagés dans l'association, et c'est en somme, ce nous semble, la meilleure des solutions. »

[1] *Irrigations du midi de l'Espagne*, Études sur les grands travaux hydrauliques et le régime administratif des arrosages de cette contrée, par Maurice Aymard, ingénieur des ponts et chaussées, 1864, 1 vol. avec atlas, chez Lacroix, éditeur.

Lors de la visite de M. Aymard, en juillet 1862, le fleuve était à un bon étiage normal; il débitait $11^{mc},25$, et les huit canaux se partageaient ce volume.

Le canal de Moncade, qui jouit d'anciens privilèges royaux, consommait $1^{l},22$ par seconde et par hectare; six autres canaux consommaient de $0^{l},73$ à $0^{l},98$ par seconde et par hectare. Le canal de la Rovella avait $2^{l},21$, mais il est chargé de laver les égouts de Valence.

L'assolement biennal se fait d'après la rotation suivante: en mars, on sème le chanvre, qui se récolte au milieu de juillet; aussitôt après, on sème les haricots, qui se récoltent fin octobre; en novembre, on sème le blé, qui se récolte en juin; puis le maïs, qui se récolte fin octobre; pendant l'hiver, on prépare la terre, qui se trouve prête à recommencer au mois de mars suivant.

On fume deux récoltes sur les quatre, le chanvre et le maïs.

Les terres ainsi arrosées valent, aux environs de Valence, 10,000 francs, et plus loin 6,000 francs l'hectare. Les meilleures terres des parties non arrosées ne dépassent pas 1,000 francs.

Ces chiffres mettent bien en relief toute la valeur de l'eau. Voici les points saillants des règlements de la huerta de Valence :

« L'eau est annexe de la terre. Nul ne peut vendre une terre sans vendre en même temps ses droits à l'arrosage. Nul ne peut vendre son eau isolément, et déshériter, par ce fait, une terre qui en aurait joui jusqu'alors. Cette prohibition s'applique non-seulement aux ventes et cessions définitives, mais encore aux ventes d'un simple tour d'arrosage. »

Tous les intéressés, réunis en assemblée générale, nomment le syndic, qui doit être un vrai laboureur et non un simple propriétaire; elle nomme aussi les élus qui, avec le syndic, composent le comité d'administration. Les employés et agents sont à la nomination du syndic ou du comité.

La répartition des eaux, lors des sécheresses, se fait par l'intervention incessante du syndic, des élus et des employés. On donne une grande partie de l'eau, ou même le volume entier, aux récoltes qui sont en danger, et qu'il s'agit de sauver par un secours immédiat; celles qui ne courent pas de risques sérieux sont privées de leur part d'arrosage.

A Valence, siége, tous les jeudis, sous le portail de la cathédrale, le tribunal des eaux, composé des huit syndics laboureurs : ce tribunal juge les plaintes et contestations des arrosants, prononce les amendes, et statue sur les affaires contentieuses.

C'est là une vieille institution qui ne manque pas de majesté, et à laquelle le peuple de Valence est vivement attaché.

Irrigation du Jucar. — Les irrigations par le canal dérivé du Jucar font suite à la huerta de Valence, en remontant le littoral, vers Murviedro.

Il n'y a qu'un canal de dérivation; sa largeur à la ligne d'eau, le 18 juillet 1862, était de $11^{m},50$, et la profondeur variait de 4 mètres à $4^{m},60$; le débit atteignait $25^{m},80$ à la seconde.

La prise d'eau est obtenue par un barrage en maçonnerie, formant chevron; sur 138 mètres de longueur, il est en partie normal et en partie oblique au thalweg; sur 104 mètres il est parallèle au thalweg. Il tend ainsi à rejeter les eaux sur la rive où se trouve la prise d'eau. Il les relève à 4 mètres au-dessus de l'étiage, et peut être, lors des crues, surmonté d'une lame déversante de $3^{m},25$.

Ce barrage est établi sur un lit mobile et affouillable. Pour s'opposer aux affouillements, on a adopté un couronnement à très-faible pente, revêtu en

pierres de taille reliées par des crampons de fer, suivi d'une risberme en gros blocs maçonnés et d'un tapis d'enrochements de 57 mètres de long. Les enrochements sont enfermés et fixés par un immense grillage en grosses pièces de bois.

On est arrivé de la sorte à un profil dont la longueur totale atteint 90 mètres, et ce n'est pas un exemple à imiter.

Le canal de dérivation est presque toujours en remblai de 2 ou 3 mètres sur la plaine; il est contenu dans des digues en terre, qui sont parfaitement étanches, quoique n'ayant que 3 à 4 mètres de largeur en couronne. Là où les terres de remblai étaient trop légères, on a eu recours à un revêtement intérieur de 4 mètres de hauteur, avec fruit de 1 mètre, et avec une épaisseur de $0^m,40$ en haut, de $0^m,80$ en bas.

Les torrents que rencontre le canal sont traversés par des siphons souterrains en maçonnerie de pierres de taille. Dans l'un de ces siphons, de 140 mètres de longueur, la dénivellation entre les plans d'eau à l'entrée et à la sortie est de $1^m,49$, ce qui donne une vitesse moyenne de 3 mètres à la seconde; cette vitesse paraîtra sans doute bien considérable pour des maçonneries ordinaires.

Irrigations d'Alicante. Barrages, réservoirs. — Mais ce qu'on trouve de plus curieux, en fait d'irrigation, en Espagne, ce ne sont pas les simples dérivations comme celles que nous venons de citer, ce sont ces barrages élevés qui transforment une vallée en un réservoir dans lequel s'accumulent les pluies d'hiver; pendant la sécheresse, l'eau emmagasinée dans le réservoir s'échappe peu à peu et maintient dans les parties inférieures de la vallée une humidité bienfaisante.

Ce système des barrages réservoirs est le plus convenable sous des climats comme ceux d'Espagne et d'Algérie, dans lesquels la saison pluvieuse et la saison sèche sont bien nettement tranchées. Sous le climat du nord de la France, il tombe plus d'eau en été qu'en hiver; les rivières ne connaissent pas la pénurie profonde qui caractérise les cours d'eau de l'Algérie et de l'Espagne. Dans ces pays, en effet, il tombe des masses considérables de pluie pendant une saison, et à cet excès d'humidité succède une sécheresse de plusieurs mois. C'est donc une sage précaution que de mettre en réserve l'eau en excès pour l'employer lorsque le ciel n'en fournit plus.

On constitue cette réserve en barrant les vallées par des murailles élevées qui transforment ces vallées en étangs.

Le plus ancien barrage, construit par les Maures, est celui d'Almansa. Sa hauteur est de $20^m,69$; il est enraciné dans les flancs de la montagne, et, à 2 mètres au-dessous de la crête, on a creusé dans le roc un canal qui forme déversoir et qui livre passage aux eaux surabondantes lorsque le réservoir est plein.

A la base du massif est ouverte une galerie de prise d'eau qui a 1 m. de large sur 1 m. de haut. Cette galerie est fermée à l'aval par une ventelle verticale en bronze, laquelle est manœuvrée par une vis en fer mobile dans un écrou fixe; le tout est placé dans une petite chambre immédiatement au-dessus de la galerie.

La galerie n'est aucunement protégée contre les obstructions et les dépôts qui se produisent pendant les crues; aussi est-on forcé alors de maintenir la ventelle levée sur une certaine hauteur afin de produire une chasse continue qui s'oppose à la formation des dépôts dans la galerie.

Mais ces dépôts ne s'en forment pas moins à l'extérieur, et au bout de quelques

années le réservoir serait complétement rempli, si l'on ne s'était ménagé les moyens de faire le curage, moyens que nous dirons tout à l'heure en parlant du barrage d'Alicante.

La plaine qui touche Alicante est irriguée çà et là au moyen de norias et de mares, appartenant à des particuliers.

Les norias à manége sont mues par un mulet ; elles se composent de courroies en sparterie, sur lesquelles sont attachés des vases en poterie, qui puisent l'eau au fond du puits et la déversent à la hauteur voulue. Les puits se ramifient à leur base en une série de galeries horizontales qui vont capter les eaux dans les assises aquifères : l'invention de ces galeries mérite d'être signalée eu égard à l'époque à laquelle elle remonte.

Les mares sont des cavités avec revêtements en maçonneries imperméables ; on emmagasine dans ces mares le produit des pluies et les petites sources qu'on peut recueillir et qui, abandonnées à elles-mêmes, ne produiraient qu'un effet insignifiant. — Il y a une de ces mares qui contient près de 20 000 mètres cubes et qui est alimentée par des rigoles dirigées sur les versants voisins de manière à recueillir à l'époque des pluies toutes les eaux superficielles.

Le climat d'Alicante est encore plus sec que celui de l'Algérie et c'est ce qui explique les précautions prises et les dépenses faites en vue de combattre le mal produit par l'aridité du sol.

Au nord d'Alicante se trouve la huerta, dont la superficie est de 3700 hectares ; ses terres irriguées ont une grande valeur, elles renferment en vignobles les crues de Muscatel et de Malvoisie.

Les eaux d'irrigation de la huerta d'Alicante sont empruntées au Rio Monegre dont le cours supérieur est barré par le plus beau barrage de l'Espagne, le barrage de Tibi.

Il est situé au point le plus resserré de la gorge au fond de laquelle coulait le torrent. Sa largeur au fond n'est que de 9 mètres, au couronnement elle atteint 58 mètres. La gorge est de toutes parts formée par des bancs calcaires extrêmement durs.

Le barrage est tout en maçonnerie, figure 1 planche XIV, avec revêtements en pierres de taille dont les faces vues ont 0,90 sur 0,45. Sa hauteur est de 41 mètres et il est profilé en plan suivant un arc de cercle de 107 m. 125 de rayon, ce qui, pour une corde de 58 mètres, fait 4 mètres de flèche ; de la sorte, la maçonnerie forme voûte pour résister à la pression des eaux.

La largeur au couronnement est de 20 mètres ; le parement amont a un fruit régulier de 3 mètres et le parement aval un fruit par gradins de 5,70, ce qui porte à 33,70 la largeur de base.

Ce barrage constitue un réservoir de 3,700,000 mètres cubes, qui donne 1000 mètres cubes pour chaque hectare de la huerta : cela suffit pour deux arrosages par été.

Le barrage est traversé par deux galeries, comme le montrent les figures : l'une est la galerie de prise d'eau, l'autre la galerie de curage.

La galerie de prise d'eau est à peu près horizontale : elle est alimentée par un puits parallèle au parement d'amont, ménagé à $0^m,60$ à l'arrière de ce parement avec un diamètre de $0^m,80$. — Dans le puits aboutissent des barbacanes laissant entre elles $0^m,40$ de maçonnerie pleine dans le sens vertical et $0^m,30$ dans le sens horizontal ; il y a sur une même ligne horizontale deux de ces barbacanes qui sont des rectangles de $0^m,11$ sur $0^m,22$. — De cette manière les eaux peuvent entrer dans le puits, quelle que soit la hauteur de vase accumulée

sur le parement d'amont. — La galerie de prise d'eau est fermée à l'aval par une ventelle en bronze de 0m,54 sur 0m70, que l'on manœuvre par une tige à crémaillère et des roues dentées, placées dans une chambre en maçonnerie située au-dessus de la galerie.

— Les eaux torrentielles arrêtées par le barrage entraînent une grande quantité de vase qui se dépose à l'amont, et en quatre ans la hauteur du dépôt atteint 12 à 16 mètres. — On l'expulse par la galerie de curage dont l'orifice amont a une largeur de 1m,80 pour une hauteur de 2m,70; ce goulot va en s'évasant à mesure qu'on descend le thalweg et les vases, compactes à l'entrée, vont sans cesse en se diluant; aucune obstruction n'est à craindre (fig. 2). — Le goulot est fermé par deux portes: celle d'amont est formée de pièces de bois de 0m,30 sur 0m,30, placées verticalement, assemblées entre elles à rainures et languettes et calfatées; elles s'engagent dans deux rainures ménagées, l'une dans le ciel, l'autre dans le radier de la galerie; une de ces poutres forme clef, on la pose la dernière, aussi est-elle plus courte que les autres et elle ne pénètre pas dans la rainure supérieure. — Après cette première porte, vient une contre-porte, formée de poutres horizontales, placées les unes au-dessus des autres et engagées à chaque bout dans des rainures verticales : la dernière ne touche pas le ciel de la galerie, sans quoi on ne pourrait l'introduire. — Derrière la contre-porte on trouve des poteaux verticaux arcboutés par des étais, lesquels buttent contre le radier au moyen d'entailles spéciales.

La vase accumulée pendant quelques années à l'amont prend une certaine consistance, ce qui permet de procéder à l'opération suivante, qui, sans cette circonstance, serait fort dangereuse. — Des ouvriers pénètrent dans la galerie de curage, ils enlèvent les étais et la contre-porte; ils percent un trou dans la première porte pour reconnaître la consistance de la vase, puis ils se mettent à affaiblir les bois peu à peu tout autour de la galerie. — Lorsqu'aucun mouvement ne se manifeste, on brusque l'opération, on scie les bois et on les enlève; il ne reste qu'une muraille de vase. — Les ouvriers montent alors sur le couronnement, du haut duquel ils font osciller au moyen d'un treuil et d'une poulie une barre à mine en fer, de 0,06 d'équarrissage, de 18 mètres de long, pesant 500 kigrammes.

A mesure que le trou de mine pénètre dans la vase, la pression de l'eau augmente sur la paroi de vase qui masque la galerie; la masse vaseuse s'avance peu à peu, puis, tout à coup, l'eau s'ouvre passage et c'est une débâcle des plus violentes. Les eaux continuent la besogne et bientôt elles ont complètement nettoyé le fond du réservoir.

On voit que cette importante opération, exécutée avec précaution, donne par des moyens simples des résultats efficaces et économiques; elle n'a, paraît-il, jamais donné lieu à aucun accident. On perd, il est vrai, les bois de la première porte; mais, après quatre ans de séjour dans l'humidité, ces bois n'ont guère de valeur.

Il va sans dire que le curage se fait à l'origine de la saison des pluies.

Le barrage d'Alicante paraît être l'œuvre de l'architecte Herreras, le constructeur de l'Escurial; il date de la fin du seizième siècle.

Irrigations d'Elche. — Elche est une ville située à 22 kilomètres d'Alicante, sur la route de Murcie. Elle a recours pour ses irrigations aux eaux salpêtrées du Rio Vinolapo, eaux impropres à la boisson et même à diverses espèces de végétations; mais elles conviennent parfaitement au palmier, au grenadier, au caroubier et à l'olivier. Elche fournit des dattes et des palmes aux pays voisins.

Dans le système des irrigations d'Elche nous signalerons le partiteur et le barrage.

Partiteur. Le partiteur se trouve en tête de chacun des canaux secondaires branchés sur l'aqueduc principal et à chacun il donne la part qui lui revient dans le volume total. Cette part est variable chaque jour, car l'eau n'appartient pas au sol : elle se vend tous les jours à une sorte de Bourse. — En amont du partiteur (fig. 8 et 9, pl. XIV), l'aqueduc est à peu près horizontal; il possède une certaine longueur de bajoyers en maçonnerie, de sorte que l'eau se déverse tranquillement comme une nappe de cristal sur le déversoir *b;* à l'aval est un second déversoir *c* qui détermine un appel constant du courant et empêche le premier déversoir d'être jamais noyé. Entre les deux déversoirs et suivant le fil de l'eau s'avance une dalle verticale *mn*. Si elle existait seule, la répartition des eaux se ferait dans un rapport fixe; mais elle est garnie à l'avant d'un bec pointu *p*, en bois dur, mobile autour d'un axe vertical et roulant sur le cylindre qui forme la proue de la dalle.

La répartition varie suivant la position qu'on donne à ce bec effilé, et les divers rapports, calculés une fois pour toutes, correspondent à une série de trous percés dans une potence de fer; avec une broche en fer on arrête le bec au trou convenable.

Il va sans dire que le procédé cesserait d'être suffisamment exact, si le bec pouvait prendre une trop grande inclinaison par rapport au fil de l'eau. — Il faut donc proportionner la longueur de ce bec à l'amplitude de l'angle maximum qu'il est appelé à décrire.

Barrage. Le barrage d'Elche, dont la manœuvre est presque identique à celle du barrage d'Alicante, a 23m,20 de hauteur, 12 mèt. de largeur à la base, un fruit total de 1 mèt. à l'amont et de 2 mèt. à l'aval. Il est fondé et encastré dans le rocher. — Il est quelquefois surmonté par les crues, comme le barrage d'Alicante, il n'en est résulté qu'une seule fois une brèche sérieuse, et ce fait montre bien toute l'utilité de déversoirs établis en vue de débiter les plus grandes crues.

Remarque générale sur les barrages d'Espagne. Nous sommes forcé de nous limiter à ces notions sommaires sur les irrigations de l'Espagne. L'ouvrage de M. l'ingénieur Aymard renferme bien d'autres points intéressants, plutôt administratifs que techniques; le lecteur pourra se reporter à son livre.

Ce que nous voulions mettre en évidence, c'était l'utilité des barrages réservoirs qui paraissent appelés à rendre de grands services à notre colonie africaine.

« Tous ces barrages d'Espagne, dit M. Aymard, sont en maçonnerie.

Les barrages simplement en terre sont inconnus en ce pays.

Les barrages mixtes en terre et maçonnerie le sont tout autant. On n'a fait en ce genre que l'infructueux essai du Guadarrama.

Tous les barrages existants reposent sur un sol de rocher entièrement incompressible et inaffouillable et sont enracinés dans des rochers de même nature.

Le seul qui fît exception à cette règle était celui de Puentes. Il reposait sur les graviers du lit. Il a été emporté dans les circonstances suivantes: 13m,40 de hauteur de vase agglutinée au fond du réservoir, 33m,40 de hauteur d'eau au-dessus de la vase. La maçonnerie n'a pas été culbutée, mais le fond a cédé sous la charge. Il faut en conclure que les barrages en terre, quels que soient les soins que l'on apporte à leur exécution, sont tout à fait incapables de résister à

des charges d'eau qui avoisinent 30 mètres. La prudence veut que l'on reste notablement au-dessous de ces limites. »

5° Des irrigations en Algérie

La question des irrigations en Algérie trouve naturellement sa place après l'étude des irrigations d'Espagne. — C'est en créant des réservoirs artificiels qu'on peut arriver à la résoudre : il faut emmagasiner les eaux surabondantes de la saison humide pour les utiliser quand vient la sécheresse.

Irrigations de la Mitidja. — Dès 1853, M. l'ingénieur Aymard, à qui on doit des études suivies sur les arrosages d'Algérie, a publié sur les irrigations de la plaine de la Mitidja un intéressant mémoire dont nous résumerons les points principaux.

Lorsqu'on s'avance des bords de la Méditerranée vers le Sahara on rencontre près de la côte une première chaîne de montagnes, le Sahel, et plus loin une seconde chaîne parallèle à la première et parallèle à la côte, l'Atlas. Entre le sommet du Sahel et le pied de l'Atlas s'étend la plaine de la Mitidja dont la largeur est de 18 kilomètres et la longueur de 90 kilomètres.

La Mitidja se partage en deux régions différentes : près du Sahel, ou trouve la basse plaine qui est marécageuse ; au pied de l'Atlas est la haute plaine, traversée en hiver par des torrents qui se déversent dans les marais d'en bas et qui sont presque entièrement à sec en été. C'est à peine si en été on trouve l'eau nécessaire à l'alimentation des hommes et des animaux.

En 1849, la quantité d'eau envoyée par la montagne à la plaine, sur une étendue de 50 kilomètres, n'atteignait pas pendant la saison sèche 900 litres à la seconde.

« Le mal serait moins grand, dit M. Aymard, si, en compensation de cette disette d'eau, les champs avaient le bénéfice des pluies. Mais, en même temps que les rivières tarissent, les pluies cessent complétement ; et, pendant quatre mois, de juin à septembre, pas un nuage ne vient altérer l'implacable sérénité du ciel. »

La faible quantité d'eau qui coule de la montagne vers la plaine est encore diminuée par les infiltrations dans le sol et par l'évaporation.

Le sol de la haute Mitidja, formé de terrains de transport, est éminemment perméable, et son avidité pour l'eau s'exerce facilement, vu l'extrême division des ruisseaux. — Dans des canaux en terre déjà imbibés, avec pente de 0,025, la perte moyenne par litre pour 1 mètre de parcours a été de

0l,00025	lorsque le volume originel	était de	10 litres	à la seconde.
0l,0001	—	—	30	—

Cette perte comprend les infiltrations et l'évaporation.

Les expériences directes de M. Aymard sur l'évaporation ont montré que l'évaporation horaire moyenne était représentée par une tranche d'eau de

0m,000471 dans un vase calme,
0m,000659 dans un vase agité.

Ces chiffres d'évaporation sont comparables à ceux que cite M. de Gasparin, qui indique pour la valeur de l'évaporation horaire moyenne :

A Orange et à Marseille 0^{m}0004, à Arles et à Rome 0^{m}0005.

En été, les torrents de l'Atlas montrent leur lit à sec parcouru par un mince filet d'eau dont la présence est signalée par des bouquets de tamarins et de lauriers-roses. Pendant la saison des pluies, ces cours d'eau deviennent impétueux et renversent tous les obstacles qu'ils rencontrent. — En effet, sur le chiffre de pluie de 939 millimètres qui tombe annuellement à Alger, 333 tombent d'octobre à mai et les 4 mois de novembre à février fournissent à eux seuls 606 millimètres.

Les ouvrages d'art à établir sur les cours d'eau d'Algérie doivent donc être construits avec les plus grandes précautions, car ils auront à subir en hiver des attaques furieuses et incessantes. — Les dépôts auprès de ces ouvrages ne pourront manquer d'être considérables, vu la nature friable des versants que l'on peut comparer à ceux des Hautes Alpes.

En effet, la Mitidja tout entière est due aux déjections des cours d'eau qui descendent de l'Atlas : la plaine haute a retenu les gros blocs et les graviers, la plaine basse près du Sahel a recueilli la vase.

En été, la plaine basse reste marécageuse et est séparée dé la plaine haute par une ligne de sources et de suintements ; c'est suivant cette ligne que paraissent au jour les eaux souterraines qui descendent de la montagne à travers le sol perméable de la plaine haute. — Ces eaux, qui ne produisent qu'un effet nuisible, puisqu'elles ne donnent que des marécages; sont beaucoup plus abondantes que les eaux superficielles, et, convenablement aménagées, elles pourraient offrir aux irrigations une ressource précieuse : leur existence est révélée par les puits que l'on ouvre à travers le sol perméable de la Mitidja supérieure.

La figure 3, planche XXI, coupe en travers de la Mitidja, fait bien comprendre ce phénomène de l'écoulement souterrain que nous avons eu déjà plus d'une fois l'occasion de signaler.

Le volume qui s'écoule dans le sol, en été, est incomparablement supérieur à celui qui prend un cours superficiel.

Pour utiliser ces eaux souterraines, qui ne paraissent pas former une nappe soutenue, mais qui cheminent sans doute par filets séparés, il y aurait lieu d'établir des galeries filtrantes souterraines, à peu près parallèles au pied de la montagne, et dont le radier se trouverait à la surface de séparation des assises perméables et des assises imperméables.

Dans ces galeries filtrantes viendraient s'embrancher normalement des galeries de prise d'eau, dirigées suivant la pente des versants, pente qui est de 0,02; après un parcours peu étendu, ces galeries déboucheraient au jour et amèneraient sur le sol les eaux captées dans les profondeurs de la terre.

— Nous ne savons si ce projet a reçu un commencement d'exécution ; en tous cas, il est logique et a pour lui la sanction de l'expérience, car il est appliqué depuis longtemps dans les cariz de la Perse, dont M. de Gasparin donne la description suivante :

« Quand les terrains que l'on veut arroser se trouvent sur la pente d'une colline, et que l'on a reconnu les points qui peuvent renfermer des sources ou des dépôts d'eau, on creuse, au bas de la pente, un puits très-peu profond ; puis, en remontant la pente, un autre puits plus profond ; on creuse ainsi une foule de puits que l'on met tous en communication par une voie souterraine. La profondeur de ces puits augmente à mesure que l'on remonte la colline, et on

a soin de les disposer de façon que le canal souterrain ait une déclivité vers la plaine. La communication entre deux puits n'est ouverte définitivement que quand le puits supérieur est creusé entièrement. Alors, les eaux trouvées au fond de chaque puits se dirigent par le canal dans le puits inférieur. Si elles le surmontent, on arrose directement le sol; sinon, on y puise l'eau au moyen de machines, pour la verser dans un conduit qui la transmet aux champs. »

Pratique des arrosages en Algérie. — Tout le monde sait, dit M. Aymard, que la sécheresse est une des plus grandes plaies de l'Algérie; que les moyens d'irrigation y sont rares; que, dans toutes les localités où on peut arroser, la transformation du sol est radicale; que le moyen le plus efficace pour assurer en abondance à ce pays les eaux d'arrosage que la nature lui a refusées consiste à emmagasiner les eaux d'hiver dans les vallées converties en réservoirs, partout où ces vallées présentent des dispositions avantageuses, tant sous le rapport de l'assiette du barrage que sous celui du réservoir proprement dit.

— Deux données importantes du problème, au point de vue pratique et économique, sont les suivantes :

1° Quelle est pour chaque nature de culture le volume d'eau nécessaire en Algérie, pendant la saison d'arrosage?

2° Quelle est la taxe d'arrosage qu'il est permis d'imposer à l'agriculture en faveur des compagnies concessionnaires de la vente des eaux, sans risquer de paralyser le développement des irrigations?

Telles sont les deux questions que M. l'ingénieur Aymard avait été chargé d'étudier et de résoudre. Les résultats détaillés de ses recherches sont consignés dans un mémoire publié en 1870 dans les annales des ponts et chaussées. — Il a opéré par les moyens les plus simples : à chaque arrosage, il jaugeait le volume employé au moyen de petits barrages en déversoir et il s'enquérait, auprès de cultivateurs expérimentés, du nombre d'arrosages nécessaire à chaque espèce de culture.

Conditions d'un bon arrosage. — En principe, un arrosage doit consister à humecter la racine de la plante et non à humecter le sol d'une manière indéfinie.

C'est donc une pratique vicieuse que de remplir un bassin jusqu'à la crête des bourrelets; on donne ainsi aux plantes un excès d'humidité, on rend la terre compacte, et on consomme en pure perte un grand volume d'eau.

« Un bon arroseur procède différemment : aussitôt que, dans le sillon ou la table qu'il arrose, l'eau se trouve arrivée à une certaine distance de l'extrémité aval, il estime que la queue d'eau suffira pour arroser cette extrémité, et il coupe immédiatement l'eau pour la jeter dans la table ou dans le sillon voisin. »

Un arrosage ne peut être exécuté dans de bonnes conditions que si les eaux courent et ne restent pas stagnantes. D'où la nécessité de pentes accusées pour les champs. — La pente la plus convenable paraît être celle de 0m02 par mètre. — Les irrigations par infiltration sont excessivement rares en Algérie; en général, on procède par submersion comme nous venons de le dire; et ce système permet de consommer beaucoup moins d'eau qu'il n'en faudrait avec l'arrosage par infiltration.

On a soin du reste de ne submerger que la surface qui en a réellement besoin : ainsi on procédera par nappes continues pour les prairies et les semis; mais, s'il s'agit de culture par billons, on ne mettra l'eau que dans les creux et on évitera de mouiller les bourrelets; tel est le cas des légumes, du maïs, du

tabac, du coton; enfin, lorsqu'il s'agit d'arroser des arbres, on amène l'eau uniquement dans les cuvettes ménagées au pied des arbres, tels que les orangers, les oliviers.

Le débit le plus convenable du canal alimentaire est de 8 à 10 litres à la seconde, et la longueur des sillons ne doit pas dépasser 20 mètres, la pente longitudinale étant de 0,02.

Dans ces conditions, un homme seul suffit à l'arrosage.

Avec un débit moindre, l'eau ne court pas bien; elle met trop de temps à parcourir la planche, elle reste stagnante et il y a une plus forte consommation.

Avec un débit plus fort, il faut le fractionner, ou bien il y a gaspillage d'eau; les arroseurs ne peuvent suffire et se laissent gagner par l'eau.

Si la longueur du sillon est inférieure à 20 mètres, le filet arrive au bas du sillon avant que l'arroseur ait eu le temps d'ouvrir le sillon voisin; d'où excès d'eau dans le bas et consommation inutile.

Si la longueur est supérieure à 20 mètres, l'eau circule mal au delà de cette distance, il lui faut beaucoup de temps pour arriver au bout et il s'en consomme inutilement une grande quantité dans les parties humectées tout d'abord.

En ce qui touche la consommation, elle dépend très-peu de la nature physique du sol : un terrain graveleux ne se fendille pas par la chaleur et se recouvre dès le premier arrosage d'un limon léger formant une légère croûte peu perméable; entre deux arrosages, un terrain argileux se crevasse profondément et, lorsqu'on y met l'eau, il s'en perd beaucoup dans les crevasses. — Les façons données à la terre, les amendements, les fumiers, ont pour effet d'effacer les différences physiques de la superficie, de sorte qu'en résumé il s'établit une véritable compensation et il est inutile de tenir compte de la nature du sol lorsqu'on s'occupe de la consommation.

Les tableaux suivants résument la consommation d'eau dans les divers genres de culture :

1° PROVINCE D'ALGER.

Arrosages par nappes..	Luzerne.	400 m. c. à l'hect. par arrosage.	1 arrosage tous les 15 j.
— par billons..	Tabac, maïs, jardinages, coton, betteraves, vignes.	Idem	Rotation variable suivant les cultures comme il sera dit ci-après.
— par cuvettes.	Orangeries.	Idem	1 arrosage tous les 15 j.

2° PROVINCE D'ORAN.

Dans la plaine de Saint-Denis du Sig, la consommation est à peu près la même que dans la plaine d'Alger. — Mais les terrains sablonneux de Mostaganem, et les terrains noirs, salés et argileux, de Relizane, exigent 800 mètres cubes à l'hectare pour un arrosage par nappes et 600 mètres cubes pour un arrosage par billons.

On conçoit que la quantité d'eau pour un arrosage dépend surtout de la disposition du sol, planches régulières, billons ou cuvettes, et non de la nature de la culture ; mais c'est dans le nombre des arrosages que celle-ci intervient, et il y a des plantes qui demandent à être arrosées beaucoup plus souvent que d'autres.

Nous examinerons successivement les diverses espèces de cultures.

Luzerne. — Les prairies permanentes, comme celles de France, n'existent pas en Algérie. A la suite de l'hiver et du printemps pluvieux, toutes les terres se couvrent d'une abondante verdure qui sert de pâturage jusqu'aux grandes chaleurs. Dans la partie basse de la Mitidja, on trouve bien une prairie permanente, mais elle ne donne qu'une coupe par an, quels que soient les soins dont on l'entoure, en dépit des arrosages et du fumier; on a semé les herbes d'Europe, mais elles n'ont pas tardé à disparaître.

La prairie artificielle, la luzerne, a au contraire parfaitement réussi, grâce à ses racines pivotantes qui vont chercher l'humidité dans les profondeurs du sol. Elle donne six coupes, une par mois, de fin avril à fin septembre. Chaque coupe produit 20 à 25 quintaux, soit en tout 135 quintaux qui, à 6 francs, font un produit brut de 800 francs.

Les frais annuels n'atteignent que 400 francs, y compris 60 francs pour la main d'œuvre de dix arrosages.

La luzerne fleurit six fois, de fin avril à fin septembre ; on la coupe après chaque floraison ; un arrosage suffirait à la rigueur après chaque coupe ; mais, pour avoir une bonne récolte, il faut deux arrosages après chaque coupe, soit dix arrosages en tout, car il n'y en a pas besoin après la dernière coupe.

La consommation annuelle est donc de 4000 mètres cubes par hectare, soit une consommation continue de 0 ^{lit} 30, en supposant que l'on prenne pour l'arrosage les précautions ci-dessus indiquées.

Ce chiffre est bien au-dessous de celui qu'on atteint en Provence, où les luzernes ne sont pas réglées par tables inclinées limitées à des bourrelets, où la pente est nulle ou insuffisante, où l'eau est livrée à un gaspillage continuel.

Cultures maraîchères. — Les petits légumes s'arrosent deux fois par semaine, les gros une seule fois par semaine ou même tous les dix jours. En moyenne, il faut compter sur six arrosages par mois.

Cette proportion dure pendant les six mois de sécheresse.

Pendant les six mois de la saison humide, il est prudent de compter encore sur trois arrosages par mois.

36 arrosages, pendant six mois d'été, donnent, à raison de 800 mètres cubes par arrosage, 14 400 mètres cubes à l'hectare, soit un débit continu de 0 ^{lit} 95 par seconde et par hectare.

A Tlemcen, un jardin très-bien tenu, de 2 hectares, a donné un produit brut

de 3400 francs pour une dépense de 1800 francs, non compris le travail de la famille du jardinier; le dépense étant de 1800 francs, il est resté un produit net de 800 francs par hectare.

Maïs. — Se sème courant avril, sur une terre billonnée. — Quatre arrosages : 5 et 25 mai, 15 et 30 juin — se récolte vers le 15 juillet.

Les 4 arrosages consomment 1600 mètres cubes en deux mois, soit un débit continu de 0 lit 31 à la seconde.

Le revenu brut est de 420 francs et la dépense de 130 francs.

Orangers. — Il faut pendant les six mois de saison sèche 12 arrosages à 400 mètres cubes, ce qui fait un débit continu de 0 lit 31 à la seconde.

Une bonne orangerie de Blidah, de 1 hectare de superficie, a donné 60 000 oranges et mandarines vendues 2500 francs. La dépense a été de 800 francs, d'où un bénéfice net de 1700 francs. Mais l'orangerie vaut 10 000 francs dont l'intérêt à 10 % est de 1000 francs, et il ne reste qu'un bénéfice de 700 francs.

Au pied de chaque arbre est une cuvette de 1 m 50 à 2 m de diamètre, fumée tous les ans et binée cinq fois.

Tabac. — Les semis de tabac se transplantent vers le 15 avril, premier arrosage; 15 mai, un piochage et un arrosage; 15 juin et 15 juillet, un arrosage. La récolte se fait en août.

Donc, quatre arrosages ou 1600 mètres cubes en 3 mois, soit un débit continu de 0 lit 20 à la seconde et à l'hectare.

Vigne et olivier. — En France, la vigne n'a pas besoin d'être arrosée. En Espagne et en Algérie, elle souffre fréquemment de la sécheresse, et il faut compter sur un arrosage de 1 200 mètres cubes pendant trois mois de saison sèche, soit un débit continu de 0 lit 15.

L'olivier s'arrose régulièrement tous les mois à Tlemcen. En Kabylie, il ne s'arrose pas.

Taxe d'arrosage. — D'aprés les calculs de M. Aymard, l'agriculteur peut supporter une taxe de 8 francs par arrosage de 400 mètres cubes; ce qui revient à dire qu'on peut taxer à 0 fr. 02 le prix du mètre cube d'eau.

C'est d'après cette évaluation que les compagnies concessionnaires doivent établir leurs calculs de premier établissement.

Barrage du Chéliff. — Sur 200 kilomètres à l'amont de son embouchure à Mostaganem, le Chéliff coule dans une plaine presque parallèle au rivage. Sur 12 kilomètres de longueur, cette plaine est interrompue par des gorges profondes et resserrées; sur les dix premiers kilomètres, ces gorges forment un goulot continu et uniforme.

C'est à 4 kilomètres de l'origine de ces gorges qu'on a construit, en travers de la vallée, un barrage de 11 m 75 de hauteur, destiné à retenir l'eau nécessaire à l'irrigation de 12 000 hectares de terre.

Le débit minimum du Chéliff, de juillet à septembre, ne descend pas au-dessous de 1500 litres par seconde; d'avril à octobre, ce débit varie en général de 3 à 5 mètres cubes. Le débit des crues ordinaires est de 400 mètres cubes, et celui des grandes crues atteint 1100 mètres cubes; le courant pourra alors surmonter de 3 mètres le couronnement du barrage.

Le plan d'eau s'étend jusqu'à 10 kilomètres à l'amont, lorsqu'il affleure le couronnement, et l'emmagasinement atteindrait 5 millions de mètres cubes si l'on pouvait empêcher les envasements et les dépôts à l'amont.

Le canal de prise d'eau est exécuté avec une pente de 0m,00033 par mètre;

les terrassements sont effectués en vue d'un débit de 3000 litres à la seconde et les travaux d'art en vue d'un débit de 9000 litres afin de réserver l'avenir.

L'exécution de cet ouvrage a présenté de grandes difficultés. Nous l'examinerons au point de vue théorique et pratique lorsque nous étudierons les murs de réservoirs dans le Traité de navigation.

Irrigations de l'Habra. — Les travaux de colonisation exécutés dans la plaine de l'Habra (province d'Oran) par une compagnie aidée d'une subvention de l'État sont parmi les plus importants et les plus remarquables. M. l'ingénieur des ponts et chaussées Pochet en a rendu compte dans un mémoire très-intéressant, publié en 1875; nous ne les examinerons ici qu'au point de vue de l'irrigation proprement dite.

L'Algérie présente sur toute sa longueur le relief que nous avons déjà indiqué en parlant de la Mitidja : sur le bord de la mer, on trouve une plaine, le Tell, dont les cours d'eau se jettent dans la mer; après le Tell, vient une première chaîne de montagnes, au-dessus de laquelle on rencontre les grands plateaux; la Mitidja en fait partie, l'altitude des hauts plateaux varie de 600 à 1200 mètres et leurs cours d'eau se perdent dans les lacs intérieurs ou chotts; les hauts plateaux sont limités, au sud, par la chaîne de l'Atlas, dont l'altitude varie de 1800 à 2500 mètres. Après l'Atlas vient le Sahara ou grand désert, dans equel il n'existe point de cours d'eau permanents.

La richesse des hauts plateaux est l'alfa, plante textile qui y croît à l'état naturel et dont l'exploitation prend un développement considérable.

Le Tell, dit M. Pochet, est la seule région algérienne que nous ayons intérêt à coloniser et à développer.

Tous les cours d'eau algériens ont une allure torrentielle; leur bassin est dénudé et soumis à une évaporation considérable. Il y a dans l'année deux saisons : la saison des pluies, d'octobre en mai, et la saison sèche pendant laquelle toutes les cultures deviennent arides et périssent si on ne peut les arroser.

L'Habra débite d'ordinaire 3 mètres cubes en hiver; en été, son débit tombe à 500 ou 600 litres; lors des crues, il atteint 700 mètres cubes. Le débit moyen ne correspond guère qu'au $\frac{1}{37}$ de la pluie tombée; cette proportion a été vérifiée pour le Sig; en France, le rapport du débit à la pluie tombée varie de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{2}$.

« La question de l'eau est, en Algérie, la question vitale pour la colonisation, et malheureusement la nature a tout fait pour la rendre plus difficile que dans tout autre pays. »

« Du moment où il est reconnu que l'eau manque dans les cours d'eau pendant l'été et que cette eau abonde en hiver, que d'un autre côté les cultures arrosées pendant l'été sont les plus productives, il n'y a qu'un pas à faire pour concevoir le projet d'emmagasiner les eaux dans des réservoirs pendant l'hiver pour les distribuer pendant l'été. La réalisation de cette idée est subordonnée à la possibilité de trouver le long du cours d'eau un réservoir large et profond fermé par un défilé très-étroit et solide pouvant offrir au barrage de bonnes fondations. Toutes les rivières ne présentent pas un ensemble de circonstances assez favorables pour l'éxécution d'un barrage-réservoir, et ce n'est qu'à la suite de recherches géologiques et topographiques fort longues qu'on arrive à trouver un emplacement convenable. Le barrage de l'Habra nous offre un exemple de ces difficultés. Son emplacement avait été fixé d'abord à 5 kilomètres environ en amont de sa position actuelle. Dans cet emplacement on trouvait un lit de rochers de grès solide d'une longueur de 100 mètres au plus, se terminant en entonnoir à la base, profil à peu près analogue à celui du barrage du Furens.

Mais, dans cette situation, la réserve du barrage était trop faible et ne répondait pas à la complète utilisation du cours d'eau. »

Pour augmenter la réserve, on descendit l'emplacement à l'aval d'un affluent important, mais le développement du barrage atteignit 450 mètres.

Par cette solution coûteuse, on créait une réserve de 30 millions de mètres cubes.

Les travaux furent mis en adjudication : l'État abandonnait 24,100 hectares de terrains domaniaux et l'adjudicataire s'engageait à exécuter :

1° Le barrage réservoir de l'Habra, en bonne maçonnerie hydraulique.
2° Le desséchement de la plaine de la Macta.
3° Les canaux pour l'irrigation des terrains à aliéner.

L'adjudicataire disposerait en outre des $\frac{2}{3}$ de l'eau disponible, le dernier tiers étant réservé à 12,000 hectares précédemment aliénés.

La société anonyme de l'Habra et de la Macta fut déclarée adjudicataire en 1865.

Nous décrirons le barrage de l'Habra en même temps que les autres ouvrages de ce genre, dans le Traité de Navigation, et nous terminerons en donnant des détails sur la manière dont on procède aux irrigations dans la plaine de l'Habra :

En Algérie, l'administration a posé le principe, que nous avons déjà signalé en plusieurs points de l'Espagne, à savoir l'annexion de l'eau à la terre; il n'est pas permis de vendre l'une sans l'autre.

M. Pochet donne pour les quantités d'eau nécessaires à l'irrigation dans la province d'Oran les chiffres suivants qui diffèrent peu de ceux de M. Aymard :

1° Les cultures d'été, coton, maïs, lin, sésame, etc., s'arrosent pendant cinq mois, mai à septembre, et exigent un débit continu de $\frac{1}{2}$ litre à la seconde et à l'hectare, réparti en dix arrosages de $0^{m},064$ d'épaisseur chacun. Cette épaisseur de $0^{m},06$ par arrosage paraît nécessaire, même en France, pour imbiber la terre. En Algérie les colateurs sont inutiles, l'eau est entièrement absorbée ou le surplus s'écoule dans les canaux des parcelles d'aval.

2° Les cultures d'hiver, céréales et fourrages, exigent, année moyenne, un débit continu de $\frac{1}{6}$ de litre à la seconde et à l'hectare, débit réparti en trois arrosages par submersion de $0^{m},10$ de hauteur chacun.

Donc, si une propriété jouit d'un débit continu de $\frac{1}{2}$ litre pendant toute l'année, elle pourra renfermer 3 hectares de culture d'hiver et 1 hectare de culture d'été.

Système de Distribution. — « Le volume total de l'eau à distribuer, dit M. Pochet, est d'abord partagé entre deux ou plusieurs *canaux principaux* dans la proportion des superficies desservies par ces canaux. Cette division se fait au moyen de déversoirs placés dans un bassin commun, en un mot au moyen d'un *partiteur*.

Le terrain à irriguer est divisé en *sections* d'une contenance uniforme et chaque *section* a un canal spécial de distribution appelé *canal secondaire* qui reçoit l'eau de son *canal principal* au moyen d'un *partiteur* semblable au partiteur général.

Le volume d'eau disponible étant ainsi réparti entre toutes les sections proportionnellement à leur superficie irrigable, il n'y a plus qu'à distribuer l'eau dans chaque section aux différentes parcelles qui doivent l'utiliser.

L'expérience a prouvé que, pour éviter tout conflit, il faut que sur le même

canal il n'y ait jamais qu'un seul irrigant à la fois ; on admet donc que chaque propriétaire aura la faculté de prendre *le débit total du canal secondaire* pendant un temps proportionné à la superficie de son terrain. C'est aux intéressés à utiliser le volume qui leur est attribué de la manière qui leur paraît la plus convenable. La semaine est prise pour unité de temps ; chaque fraction de section reçoit donc l'eau chaque semaine pendant un certain nombre d'heures indiqué à l'avance.

Détermination des sections. — Quant à l'étendue des sections, les considérations suivantes servent à la déterminer ; puisque le débit total de chaque canal secondaire doit être successivement employé par chacun des irrigants, il faut que ce débit soit tel qu'un seul irrigant puisse l'aménager ; c'est à l'expérience à l'indiquer.

Dans les premières irrigations, le débit des canaux secondaires était faible ; on n'avait pas encore l'expérience de l'irrigation. A Saint-Denis du Sig on avait établi le réseau des canaux d'irrigation de manière que chaque canal secondaire débitait 15 litres pour la zone des jardins et 25 ou 30 litres pour la culture de la plaine ; mais les cultures de Saint-Denis du Sig sont relativement très-divisées, et il est reconnu aujourd'hui par les usages que l'eau arrive trop lentement et par suite que le débit des canaux secondaires est trop faible.

Dans les concessions de l'Habra, on emploie 35, 40, 50, 60 litres par section ; à Relizane, de 80 à 100 et même 110 litres ; enfin, il y a quelques années, les syndicats de la province d'Oran furent consultés sur la question de savoir quel était le débit à admettre dans les canaux secondaires ; leur avis fut qu'en général les débits étaient trop faibles et qu'il était bon de les augmenter en adoptant comme maximum 120 litres.

A ces faits d'expérience, nous ajouterons les remarques suivantes : Dans les petites exploitations, le personnel est peu nombreux, les parcelles sont petites, il n'est pas possible d'aménager un grand volume d'eau ; 30 à 40 litres nous paraissent le chiffre moyen à adopter, encore ce chiffre doit-il être réduit à 20 litres pour les jardins.

Dans les grandes exploitations, au contraire, un grand débit est absolument nécessaire, le personnel est nombreux, les parcelles sont étendues ; un faible débit les arroserait mal et emploierait trop de temps. Par exemple, si le canal secondaire débite 100 litres et que le volume d'eau à distribuer à chaque arrosage soit de 650 mètres cubes par hectare, l'arrosage durera 6,500 secondes, soit une heure 50 minutes. Ce laps de temps nous paraît déjà considérable.

Faisons observer encore que les causes de déperdition augmentent avec la division de l'eau ; enfin, à mesure que le personnel agricole s'améliore, on éprouve le besoin de recevoir de plus grands débits et de pratiquer les irrigations plus vite. Toutes ces considérations établissent qu'on a tout intérêt à se rapprocher du maximum pratique indiqué par l'expérience ; c'est en effet la tendance actuelle.

Les terrains de la compagnie de l'Habra feront nécessairement l'objet de grandes exploitations ; nous avons cru devoir adopter le chiffre de 100 litres comme représentant le débit type des canaux secondaires. Dans les terrains du bas de la plaine où les pentes sont faibles, les grands débits sont indispensables, nous avons forcé le chiffre quand nous avons pu ; au contraire, nous avons tâché de nous tenir au-dessous pour les terrains du haut de la plaine où les pentes sont quatre ou cinq fois plus fortes.

Le débit total étant connu et le débit des canaux secondaires étant établi par les considérations qui précédent, le nombre des sections s'en déduit; si, par exemple, le débit total est de 2,000 litres et le débit de chaque canal secondaire de 100 litres, le nombre des sections sera de 20.

Dans chaque section on pourra arroser convenablement :

$\frac{100}{\frac{1}{2}}$ ou 200 hectares de culture d'été.

$\frac{100}{\frac{1}{6}}$ ou 600 hectares de culture d'hiver.

Total. . . 800 hectares.

Le surplus de la section ne pourra être arrosé qu'au détriment des 800 premiers hectares. »

Pratique de l'irrigation. Prises d'eau. — Soit un canal secondaire AB, qui doit alimenter deux sections voisines M et N, figure 7, planche XIV; au point B, on trouve un déversoir partiteur, que nous décrirons ci-après, et qui partage les eaux en deux parts proportionnelles aux surfaces à arroser : l'une des parts est pour la section M, elle s'en va par le canal BC; l'autre part est pour la section N, elle s'en va par le canal BD.

Considérons le canal BC qui alimente la section M; il a trois embranchements BE, GF, CK, qui touchent toutes les parcelles au moins en un point : chaque usager peut donc établir directement sa prise d'eau, qui est à sa charge ainsi que les rigoles intérieures.

Sur un état sont portées les parcelles de chaque section et, en regard de chacune, l'heure à laquelle elle a le droit de prendre l'eau chaque semaine et le temps pendant lequel toute l'eau de la section lui est réservée. A l'heure indiquée, le garde des eaux ouvre l'embranchement CK et donne l'eau à la parcelle 1 la plus éloignée; quand celle-ci a eu sa part, il lui coupe l'eau et la donne à la parcelle 2 et ainsi de suite jusqu'à la parcelle 6 en remontant de l'aval à l'amont; il ferme alors l'embranchement CK et passe aux embranchements supérieurs pour lesquels il opère de même.

A Relizane, chaque garde des eaux a une étendue de 1,500 hectares.

Partiteurs. — Le système des partiteurs algériens est très-simple et très-exact en apparence; aussi satisfait-il les populations, ce qui est le point principal.

Un canal principal A amène les eaux dans un bassin P, d'où elles s'échappent dans trois canaux secondaires BCD; en tête de ces canaux sont des déversoirs ayant leur seuil au même niveau. La tranche d'eau qui s'écoule par les déversoirs a donc partout même hauteur, et le volume de liquide que prend chacun d'eux est proportionnel à sa largeur. En réalité, cette répartition proportionnelle est illusoire :

1° Le volume qui s'écoule par les déversoirs C et D, perpendiculaires au canal d'amenée A, est plus grand que celui qui, à largeur égale, s'écoule par le déversoir B parallèle au courant A. — Si l'on appelle h la hauteur de la lame d'eau et v la vitesse du courant A, la charge qui produit l'écoulement en B est h

et celle qui produit l'écoulement en C et D est $\left(h + \frac{v^2}{2g}\right)$. Avec une vitesse v de 0m,60 et une hauteur h de 0m,20, le débit à largeur égale peut présenter une diminution de 4 p. 100 lorsqu'on passe de C en B. Pour atténuer cet effet, il faut augmenter autant que possible la hauteur h.

2° Le débit d'un déversoir à charge constante n'est pas proportionnel à la largeur, car la contraction sur les bords est indépendante de la largeur ; aussi le débit par mètre courant augmente-t-il avec la largeur des déversoirs.

3° Enfin, la déperdition augmente avec la longueur des canaux d'amenée; dans l'Italie septentrionale, les pertes sont de 1 p. 100 pour 3 kilomètres de parcours. Un canal de 20 kilomètres donnerait donc une perte de 7 p. 100. — Cependant, avec des eaux limoneuses, la perméabilité doit diminuer et les déperditions s'atténuer avec le temps.

Les partiteurs fixes et la rotation immuable des tours d'arrosage ont un grave inconvénient : chaque usager doit adopter une proportion fixe entre les cultures d'été et les cultures d'hiver. L'usager, qui dispose de N litres à la seconde, ne peut établir les cultures d'été que sur 2N hectares ($\frac{1}{2}$ litre à l'hectare et à la seconde), et les cultures d'hiver que sur 6N hectares ($\frac{1}{6}$ de litre à l'hectare et à la seconde). S'il change cette proportion, il arrose mal ou bien il consomme de l'eau inutilement.

C'est pour parer à cet inconvénient que le syndicat du Sig a autorisé les transferts d'eau, ou échange des tours d'arrosage pendant un certain temps entre les propriétaires qui veulent s'entendre. Lorsque les transferts se font d'une section à l'autre, ils amènent une grande confusion et une perturbation complète dans le système : il faut réduire la largeur des déversoirs partiteurs, ce qui se fait par des lames de tôle et la répartition ancienne se trouve momentanément bouleversée. Néanmoins, les transferts sont tellement utiles qu'on est forcé presque partout de les adopter, moyennant certaines restrictions, qui diront, par exemple, que les modifications se feront seulement tous les mois; le régime des transferts entraîne l'exécution de partiteurs à débit variable, et il exige aussi l'emploi de canaux à grande section qui permettent la variation du débit entre des limites assez étendues.

Canaux de distribution. Volume d'eau disponible. — On a évalué le volume à dériver du barrage en été à 3,000 litres par seconde, ce qui permet l'irrigation de 6,000 hectares en culture.

Le réservoir contient. . . . . mèt. cubes.		30,000,000
Il faut en déduire :		
1° Pour la tranche au-dessous des prises d'eau. . .	900,000 m. c.	
2° Pour l'évaporation pendant 5 mois sur 200 hect. .	1,600,000 —	
3° Pour pertes par infiltrations dans la digue et le terrain.	2,000,000 —	
Soit en tout.		4,500,000
Reste disponible.		25,500,000

ce qui, réparti sur 12,960,000 secondes, donne 2 mètres cubes à la seconde ; à ce volume, il faut ajouter le débit d'été de l'Habra, qui atteint 1 mètre cube.

M. Pochet trouve l'évaluation précédente trop élevée :

1° Les envasements seront considérables. Au barrage du Sig, ils atteignent un volume égal au $\frac{1}{35}$ de la apacité des réservoirs.

2° Les pluies d'hiver ne permettront pas toujours de remplir complétement les réservoirs, car il y a de grandes variations dans les hauteurs de pluies annuelles et on a calculé sur la moyenne.

Le chiffre précédent de 25 millions 1/2 de mètres cubes est donc un maximum. En ce qui touche l'établissement des canaux, les principes suivants ont été appliqués :

1° Les eaux de l'Habra étant très-limoneuses, il faut des pentes assez fortes pour empêcher l'envasement; d'un autre côté, il ne faut pas que les pentes soient telles que les rives puissent être corrodées par les eaux. On s'est imposé comme limites extrêmes des vitesses de $0^m,55$ et 1 mètre. Encore, cette vitesse de 1 mètre serait-elle trop forte en beaucoup de points, car le sol argilo-sablonneux de la plaine se corrode à une vitesse de $0^m,80$.

2° On a adopté pour la section des canaux un plafond horizontal avec talus inclinés à 45° et une profondeur d'eau égale à la largeur du plafond. Cette forme correspond à peu près au minimum de terrassements et a l'avantage de donner une formule très-simple pour le calcul des dimensions à adopter, eu égard au débit et à la vitesse. Les calculs ont été faits pour les deux vitesses limites $0^m,55$ et 1 mètre et pour des débits variant de 100 en 100 litres; on a dressé une table des résultats trouvés et, par interpolation, cette table a donné les dimensions des canaux dans tous les cas. Dans chaque section d'arrosage, on a compté sur un débit de 100 litres à la seconde.

3° La revanche des berges est de $0^m,40$ pour les canaux secondaires, elle s'élève à $0^m,50$ pour ceux qui desservent plus d'une section : cela suffit pour faire face au relèvement du plan d'eau causé par l'envasement et à l'excédant de débit qu'on pourra quelquefois réaliser en hiver.

4° Partout où il est nécessaire, le canal est bordé par deux digues ayant leur couronnement à $0^m,40$ ou $0^m,50$ au-dessus du plan d'eau. La largeur en couronne de ces digues a été déterminée par la formule simple

$$l + 0^m,50$$

dans laquelle l est la largeur du plafond du canal.

Les talus des digues sont à 45°; le sable argileux se tient très-bien sous cette inclinaison lorsque la hauteur ne dépasse pas 2 mètres.

Ces dispositions ont donné des résultats satisfaisants.

5° Là où les canaux sont en déblai de plus de leur profondeur normale, qui est $(l + 0^m,40)$ ou $(l + 0^m,50)$, on a établi au niveau correspondant à cette profondeur normale deux banquettes de $0^m,50$ de large, destinées à faciliter le curage et à retenir le produit des éboulements des berges.

6° On a ménagé le long de chaque canal des chemins de ronde dont la largeur est de 2 mètres pour les canaux principaux et $1^m,50$ pour les canaux secondaires.

7° Partout on s'est attaché à établir les profils en long, de manière à avoir le minimum de terrassements, en adoptant les plus fortes pentes sans dépasser les pentes limites.

Les figures 13 de la planche XIV représentent les profils en travers adoptés pour les canaux de l'Habra.

La longueur totale des canaux principaux est de 76 kilomètres et le cube moyen de terrassements au mètre courant est de 3 mètres.

Les canaux secondaires de distribution sont espacés de 400 mètres l'un de

l'autre, ce qui fait par hectare 25 mètres de canal à 0 fr. 35 le mètre courant. Il faut compter, en outre, un appareil de prise d'eau pour 10 hectares; cet appareil coûte 70 francs, ou 7 francs par hectare. Ainsi le réseau des canaux secondaires et des prises d'eau est revenu seul à 16 francs par hectare.

Les résultats économiques de l'œuvre que nous venons de décrire ne sont pas connus; quels qu'ils soient, cette œuvre n'en aura pas moins réalisé de grands avantages au point de vue de l'intérêt général.

6° Irrigations de l'Italie septentrionale

Les irrigations sont en honneur depuis un temps immémorial dans l'Italie du Nord, elles y sont très-développées.

M. l'ingénieur en chef Nadault de Buffon les a décrites dans son ouvrage intitulé : *Canaux d'irrigation de l'Italie septentrionale;* cet ouvrage renferme d'intéressants détails qui ne sauraient trouver place ici, et nous nous bornerons à donner un aperçu général du sujet.

La circonstance qui a le plus contribué au développement des irrigations dans le nord de l'Italie, dit M. Baumgarten, est la sérénité générale de l'été malgré la grande abondance de la pluie annuelle; entre Pavie et Brescia, il n'y a par an que trente ou quarante jours de pluie; dans la province de Lodi, le soleil luit la moitié de l'année, dans celle de Milan plus de la moitié, et dans celle de Brescia les deux tiers.

Il n'y a pas, en moyenne, plus de deux à trois jours de pluie par été, et ce sont alors des pluies torrentielles funestes aux récoltes.

La température ne dépasse jamais 33° et ne descend jamais au-dessous de 23°, même pendant la nuit.

Ce simple exposé fait bien comprendre toute l'importance qui s'attache à l'arrosage des récoltes.

La Lombardie est abritée au nord, à l'ouest et au sud par les Alpes et les Apennins; les vents de ces directions se dépouillent de leur humidité sur les sommets des montagnes, ce sont des vents secs qui pompent l'excès d'humidité du sol et empêchent le pays d'être aussi malsain que les Marennes. Quand souffle le vent d'est, qui remonte la vallée du Pô, l'atmosphère devient malsaine.

Ce sont les neiges des hautes montagnes qui alimentent surtout les irrigations d'été; aussi, ces irrigations sont-elles moins développées sur la rive droite que sur la rive gauche du Pô, parce que les cours d'eau de cette dernière sont en communication avec les neiges éternelles. Pour la même raison, sur la rive gauche de l'Adda on n'irrigue que les 0,5 de la contrée, tandis que sur la rive droite on irrigue les 0,8.

La pente générale de la Lombardie est favorable à une bonne irrigation; elle est assez accusée, sans être trop forte, ce qui permet à l'eau de circuler facilement sans entraîner les engrais et l'humus. Entre le lac Majeur et Venise il y a une différence d'altitude de 260 mètres pour 200 kilomètres, soit une pente de 1m,30 par kilomètre.

Sur la ligne de Milan à Mantoue apparaissent au jour de nombreuses sources, les Fontanili, que l'on recueille pour les arrosages et qui ont une température constante, un peu froide en été; mais la majeure partie des irrigations se fait

par des canaux de dérivation dont le principal est le Naviglio-Grande, dérivé du Tessin.

M. l'ingénieur Baumgarten évalue à 360 mètres cubes par seconde le volume d'eau utilisé en Lombardie pour les irrigations.

Ce sont les lits naturels des rivières qui reçoivent le produit des canaux d'égouttement et les eaux de colature.

La surface arrosée est de 400,000 hectares, dont 4000 hectares sont occupés par les marcites ou prés d'hiver. Ces prés sont disposés par petites planches peu inclinées que recouvre une mince nappe d'eau sans cesse renouvelée ; l'eau entre par l'angle d'une planche et sort par l'angle opposé pour pénétrer sur la planche voisine. « L'eau doit circuler partout d'un mouvement égal; trop rapide, le sol serait appauvri ; trop haute, le pré se couvrirait d'herbes aquatiques ; trop lente, il deviendrait marécageux. La température de l'eau doit être peu variable. Elle ne doit ni geler en hiver ni fermenter en été, elle est d'un libre usage de jour et de nuit. L'arrosage est continu en hiver. Ce système exige un volume vingt fois plus considérable que celui qui serait nécessaire pour tenir constamment le sol recouvert d'eau. »

Le volume d'eau consommé par chaque culture varie dans de grandes limites : 1 hectare de pré en marcite peut consommer par hectare une once milanaise, soit 42 litres à la seconde. — « Le même cube suffira pour arroser une surface double de maïs et triple ou quadruple de prés simples, et pourra, dans le cours d'une semaine, irriguer ainsi sept différents prés et, dans le cours de deux semaines, quinze différentes terres cultivées en maïs ; car, si ces dernières terres absorbent à chaque arrosage plus d'eau, elles n'en ont pas besoin aussi souvent. »

En pratique, les diverses espèces de cultures étant réunies, on compte sur une consommation journalière égale à une nappe d'eau variant de $0^{m},0084$ à $0^{m},0166$, ce qui représente un débit continue de 1 à 2 litres par seconde et par hectare. — Le froment et le seigle ne sont pas arrosés.

On estime que trois onces d'eau ou 10,000 mètres cubes par 24 heures suffisent à une ferme de 100 hectares, ce qui fait par hectare et par seconde 1 litre 16. — Néanmoins on comprend que ce cube varie avec la proportion des diverses espèces de cultures et aussi avec le degré de perméabilité du sol.

La nature des eaux employées à l'irrigation est aussi très-variable. — Les eaux dérivées du Tessin, à la sortie du lac Majeur, sont d'abord limpides et froides ; mais, en parcourant les terres, elles se chargent de gaz, d'humus et d'engrais, et s'améliorent notablement. — C'est généralement le contraire qui se produit en France pour les eaux de colature.

L'Adda reçoit, à l'aval du lac de Côme, des affluents torrentiels qui troublent ses eaux d'abord limpides et elles sont d'autant plus chargées que la prise d'eau se fait plus bas.

Les eaux torrentielles et boueuses sont employées en colmatages sur certains points.

Les immondices des villes profitent aussi aux canaux d'irrigation ; ainsi les marcites à l'aval de Milan doivent leur incomparable fertilité (ils fournissent par an jusqu'à huit coupes d'herbes hautes et touffues) aux eaux ménagères de Milan et aussi à la grande masse de bestiaux qu'elles nourrissent.

Le prix en capital d'une once d'eau (3,600 mètres cubes par 24 heures) est

de 12,000 à 18,000 francs suivant qu'il s'agit d'eaux de colature grasses, ou d'eaux de première main maigres.

L'établissement des beaux canaux d'irrigation dans ce pays qui les pratique depuis 2000 ans, a donné lieu à la construction de nombreux ouvrages d'art, analogues à ceux que nous avons déjà décrits. — L'étude de ces ouvrages est du reste plutôt du ressort du constructeur proprement dit.

Malgré la faveur dont jouissent les irrigations en Lombardie, la création d'un nouveau canal n'y est pas toujours facile; en tout cas, cette création est onéreuse à son premier propriétaire à cause des pertes d'eau et elle ne devient profitable qu'après un temps assez long.

On évalue à 750 millions les sommes totales dépensées pour l'irrigation de 200,000 hectares, moitié de la surface totale arrosée en Lombardie. — C'est un prix de revient de 3750 francs par hectare; c'est presque la valeur vénale de la terre, de sorte que la valeur du sol naturel est à peu près nulle.

Le Journal d'Agriculture pratique a publié en 1874 une description pittoresque des irrigations du Milanais. — Nous la reproduirons ici, parce qu'elle donne à grands traits un tableau intéressant de cette riche contrée :

« C'est un spectacle saisissant de voir, en février, les plaines milanaises couvertes de neige alors que, par exception, les marcites, protégées par une légère nappe d'eau courante, qui doit à sa température d'opérer la fonte de la neige, commencent à donner leur première coupe verte. Cinq autres coupes suivent ainsi du mois de février à l'automne, en sorte que le bétail peut être nourri au vert pendant onze mois de l'année. Un fait est très-significatif, c'est qu'un hectare de marcite nourrit facilement quatre têtes de gros bétail par an. Mais c'est un pays à part, que le Milanais, sous le rapport des irrigations. C'est le pays de l'herbe perpétuelle par excellence. Limité supérieurement par les Alpes, latéralement par l'Adda et le Tessin, et inférieurement par le Pô, il est sillonné de sources intarissables qui descendent des hautes montagnes pour se réunir dans les lacs Majeur, de Côme et de Lugan. Là, dans ces immenses bassins naturels, elles déposent leurs graviers, puis se rendent dans l'Adda et le Tessin, qui sont les principales voies d'arrosage de tout le pays, tandis que le Pô, où se jettent ces deux rivières, en est la grande voie d'écoulement.

En outre, au milieu de ce grand ensemble, et pour le rendre encore plus parfait, sont disséminés d'autres lacs et d'autres cours d'eau de moindre importance, mais qui, néanmoins, se rattachant au réseau général d'irrigation, apportent aussi, pour leur part, une grande quantité d'eau disponible en faveur de l'agriculture, des usines et de la navigation.

Telle est la topographie générale : de hautes montagnes au nord : à leur pied, une vaste plaine exposée au midi, à sol léger, à pentes douces, flanquée de deux grosses rivières d'arrosement, dominées par des lacs considérables dont l'eau ne gèle jamais, et enfin assainie par un fleuve où toutes les eaux d'irrigation peuvent se rendre par la seule loi de gravitation.

Ce n'est pas tout : à ces premiers avantages se joignent ceux d'une constitution géologique vraiment exceptionnelle. Au-dessous de la première couche de terre se trouve un lit de gravier, dont le gisement est assez parallèle à la surface du terrain. Les eaux s'infiltrent dans ce gravier et, à une certaine distance des montagnes, se rencontrent à une faible profondeur.

A cet endroit on creuse un puits, et de celui-ci se détache un canal que l'on dirige obliquement à la ligne de plus grande pente, en ayant le soin de se rap-

procher de plus en plus de la surface. On conçoit qu'alors l'eau, après avoir parcouru un trajet plus ou moins long, doit arriver à se répandre sur les campagnes et à servir pour l'irrigation.

Selon Joseph Bruschetti, cet emploi des eaux souterraines, dites de *fontanili*, remonterait à la seconde moitié du douzième siècle. Actuellement, les environs de Milan comptent de nombreux *fontanili* qui, en vertu de la température constante de leurs eaux, servent à l'arrosement des prés à marcite ou prés d'hiver, dont les coupes répétées en cette saison permettent, j'insiste sur ce point, de prolonger la nourriture au vert onze mois de l'année.

Ainsi, en résumé, pour l'irrigation de la belle saison, le Milanais possède l'eau des lacs et des fleuves abondants, et quand la température atmosphérique vient partout ailleurs arrêter la végétation, cette terre privilégiée voit sortir de ses entrailles des sources dont les eaux, répandues sur les prairies, y font croître l'herbe en dépit des frimas.

Certes, la nature a beaucoup fait pour ces heureuses contrées, mais l'homme n'a point, comme en d'autres pays, dormi sur les richesses étalées sous ses yeux : de gigantesques travaux ont, au contraire, achevé l'œuvre; une législation protectrice a réglé le cours et l'usage des eaux, aucune goutte du précieux liquide n'est perdue. Tandis que dans nos capitales nous abandonnons aux fleuves voisins les déchets de notre consommation, tandis que des principes éminemment fertilisables disparaissent ainsi sans utilité pour l'agriculture, toutes les eaux d'égout de la ville de Milan sont portées dans des canaux d'irrigation qui les versent sur les prairies.

En outre des prés à marcites, on trouve dans la province de Lodi des prés temporaires à trois coupes qui restent trois années en assolement, assolement très-riche, car il est ainsi combiné : première année, maïs fumé; deuxième année, froment; troisième, quatrième et cinquième années, prairie; sixième année, lin suivi de récoltes dérobées, savoir, en premier lieu, millet ou quarantin à grains, ou avoine pour vert, et en second lieu navette semée en juillet et août lors du sarclage du quarantin et récoltée au printemps suivant, avant la semaille du grand maïs, tête de rotation.

Voilà ce que l'on fait avec l'irrigation et le soleil d'Italie. »

Module milanais. — Les modules et les partiteurs sont deux genres d'appareils ayant pour objet la répartition des eaux.

Le partiteur, dont nous avons déjà parlé, s'emploie lorsqu'il s'agit de partager un volume variable en proportions fixes. — Ainsi, un partiteur peut diviser le débit d'un canal en trois volumes qui seraient entre eux comme les nombres 1, 2 et 3; que le débit du canal vienne à changer, la proportion reste toujours la même, bien que les volumes alloués à chaque branche subissent proportionnellement la variation qui affecte le débit total.

Le module, au contraire, s'emploie lorsqu'il s'agit d'emprunter un volume d'eau constant, 100 litres par exemple, à un canal dont le débit est, du reste, fixe ou variable.

Le module est surtout avantageux dans les partages d'eaux d'irrigation : il donne à chacun la part qui lui est due et renferme la consommation d'eau dans de justes limites.

Le module est moins utile dans les usines, car les usines ne consomment pas d'eau à proprement parler, elles ne consomment que de la chute et rendent l'eau ensuite à son cours d'eau naturel.

L'usage du module est surtout indispensable dans le cas où l'on vend

l'eau au mètre cube, et c'est une manière de faire à laquelle les compagnies de canaux d'irrigation peuvent être fréquemment forcées de recourir.

On trouvera, dans l'ouvrage de M. Nadault de Buffon, la description complète du module milanais, nous en rapporterons seulement le principe.

Considérons, figure 10, planche XIV, un canal ou une rivière dont *ab* est le plan d'eau ; en tête d'un canal de dérivation est une vanne hydrométrique V, que l'on peut lever ou baisser à volonté, de sorte que l'eau passe par-dessous en plus ou moins grande abondance. — Une dénivellation constante s'établit entre les plans d'eau *ab* et *cd* à l'amont et à l'aval de cette vanne, et cette dénivellation est d'autant plus forte que la tranche d'eau qui passe sous la vanne est moins élevée. —Supposons que la hauteur h de l'eau dans le canal vienne à varier d'une quantité k, la vanne restant à la même place, la hauteur h' à l'aval de cette vanne variera d'une quantité k et le rapport de k à k' sera le même que celui de h à h'. Si par exemple h et h' étaient entre eux comme 1 à 3 et qu'on déterminât une surélévation de $0^m,30$ à l'amont de la vanne, la surélévation ne sera que de $0^m,10$ à l'aval.

Sur le canal de dérivation, à quelques mètres de la vanne hydrométrique, on a établi en travers une dalle percée d'un orifice rectangulaire *mn*. Si l'on s'arrange de telle manière que la charge d'eau x sur l'arête supérieure de cet orifice rectangulaire demeure constante, il est clair que le volume qui s'écoulera par *mn* sera lui-même constant.

Ce volume dépendra des dimensions de l'orifice, et il est facile de le calculer par les formules que nous avons données en hydraulique ; nous n'avons pas à insister sur ce point.

La constance du niveau *cd* s'obtient en manœuvrant la vanne hydrométrique ; c'est un agent spécial qui est chargé de cette manœuvre. En général, elle n'a pas besoin d'être bien fréquemment renouvelée, car il ne se produit guère de variations brusques dans le niveau *ab* du canal ou de la rivière alimentaire.

Il est à remarquer du reste que toute variation dans ce niveau n'entraîne pour le niveau *cd* qu'une variation réduite et que, par conséquent, le volume d'eau qui s'échappe de l'orifice *mn* ne subit lui-même que cette variation réduite.

L'agent, chargé de la surveillance de la vanne V, la fixe donc à la hauteur voulue, et aucune personne étrangère ne peut y toucher ensuite, car elle est arrêtée par un cadenas dont la clef reste aux mains de l'agent.

Voici, d'après M. Nadault de Buffon, les dispositions du module milanais :

L'unité de ce module est l'once d'eau : c'est le volume qui s'écoule par un orifice rectangulaire ayant 4 onces ($0^m,20$) de hauteur uniforme et 3 onces ($0^m,15$) de largeur avec une pression constante de 2 onces ($0^m,10$) sur le bord supérieur de l'orifice.

La hauteur $0^m,20$ est toujours la même quel que soit le nombre d'onces que doive débiter l'orifice ; la largeur seule varie, elle est égale à autant de fois $0^m,15$ qu'il y a d'onces à débiter.

La bouche *mn* est taillée au ciseau dans une pierre dure, marbre ou granit, d'épaisseur à peu près constante, $0^m,03$ à $0^m,06$.

Le seuil de la vanne V est au niveau de fond du canal et la largeur de cette vanne est égale à celle de l'orifice *mn*. En amont de cet orifice est un sas de 6 mètres de long, présentant de chaque côté de la vanne un élargissement de $0^m,25$ et une pente totale de fond de $0^m,40$, pente qui a pour but d'amoindrir les tourbillonnements superficiels de l'eau. Après l'orifice *mn* est un autre sas

maçonné plus large aussi que l'orifice ; il présente d'abord une chute de 0m,05, puis un radier incliné qui favorise le départ de l'eau.

A mesure que la largeur de l'orifice *mn* augmente, l'influence de la contraction se fait moins sentir et la charge x restant constante, le débit croît un peu plus vite que la section.

Le module milanais n'a donc pas la régularité mathématique qu'on pourrait lui supposer. Néanmoins, son exactitude peut être considérée comme suffisante dans la pratique et il rend de grands services.

Partiteurs. — Le partiteur le plus simple est celui qui consiste à partager le courant du canal par une ou plusieurs piles en maçonnerie, ou plutôt par des dalles taillées en pointe, en plusieurs courants dont la largeur est dans le rapport de la répartition que l'on veut obtenir.

Cette méthode n'est exacte que lorsqu'on partage le courant en deux parties égales ; pour un rapport différent, elle manque complétement d'exactitude. Cependant elle est simple, et nous avons vu qu'elle était encore en usage en Espagne où les Maures l'ont importée.

La répartition par déversoirs est meilleure ; nous l'avons décrite en parlant des irrigations de l'Habra (Algérie). C'est à elle que les usagers sont portés à accorder la préférence; cependant nous avons montré qu'elle n'était pas exacte non plus et que l'erreur commise avec elle pouvait atteindre plusieurs centièmes.

Les déversoirs exigent l'exécution de barrages qui déterminent des envasements rapides lorsqu'il s'agit de distribuer des eaux troubles.

Il faut bien, dans ce cas, recourir à la répartition par piles placées dans le courant, ou bien encore adopter un système qui est depuis longtemps en usage en Italie et que M. l'ingénieur Pochet a appliqué aux irrigations de l'Habra, concurremment avec le partiteur à déversoir (figure 11, planche XIV).

« Cet ouvrage, dit M. Pochet, se compose de deux ou plusieurs murs A,B qui divisent le courant en trois ou quatre ou cinq courants secondaires, dont les débits doivent être dans un rapport donné. Les pentes des canaux *a b c* sont calculées de façon que la vitesse de l'eau soit la même dans les trois canaux ; dès lors le débit est proportionnel à la section. L'avantage de ce partiteur est d'éviter les envasements qui se produisent dans les partiteurs à déversoir, mais, à nos yeux, ses inconvénients dépassent de beaucoup ses avantages. 1° Il est très-coûteux. 2° Si des envasements viennent à s'y produire, la répartition est faussée. 3° La répartition faite pour un niveau est inexacte, quand le niveau vient à varier. 4° La correction de la répartition y est à peu près impossible. Nous avons dû cependant adopter cette répartition pour certains partiteurs, faute de pentes pour créer des chutes ; mais, en général, nous n'hésitons pas à donner la préférence au répartiteur à déversoir qui opère une division, sinon mathématique, du moins d'une exactitude bien supérieure. »

7° Irrigations et rizières du Portugal

Le riz est une ressource importante pour l'agriculture des pays chauds. Cette culture exige beaucoup d'eau ; elle donne lieu à d'intéressantes remarques. Nous étudierons en particulier les rizières du Portugal, sur lesquelles un mé-

moire a été publié par M. de Andrade Corvo, membre de l'Académie des sciences de Lisbonne.

La culture du riz se fait ordinairement de la manière suivante :

Au mois de mars ou d'avril, on laboure profondément et on retourne le sol, puis on le divise en bassins nivelés et environnés de digues ou bourrelets ; on introduit dans ces bassins l'eau d'irrigation et on sème le riz, qui a été préalablement trempé dans l'eau plusieurs jours.

On emploie 100 à 150 litres de semence par hectare.

Chaque bassin rectangulaire, de 1/2 à 1 hectare de superficie, est entouré de bourrelets ayant 1 mètre à la base, $0^m,50$ en couronne et $0^m,40$ de hauteur. L'eau d'irrigation entre par un angle du rectangle et sort par l'angle opposé ; elle se déverse dans un autre bassin.

L'eau conserve dans les bassins une épaisseur moyenne d'un décimètre. L'eau chauffée au soleil est plus profitable que l'eau froide ; ainsi la production du grain est moins puissante dans les bassins voisins des sources que dans ceux qui en sont plus éloignés.

Pour 1 hectare de rizière, on emploie en général 290 mètres cubes d'eau par jour, ce qui correspond à une hauteur de 29 millimètres. Mais, pour mettre cet hectare en premier état d'arrosage, il faut d'abord une épaisseur d'eau d'un décimètre, soit 1000 mètres cubes, puis 900 mètres cubes pour imbiber le sol.

Quand le sol est saturé et la rizière inondée, l'eau de chaque jour est employée en partie à l'absorption des plantes, à l'évaporation, aux infiltrations; ce qui reste détermine un faible courant dans les bassins et remplace l'eau stagnante par de l'eau fraîche.

Sur un hectare, il y a un million de plantes; chaque plante a une surface verte de 1 décimètre carré ; c'est une surface totale de 100,000 mètres carrés. Or, d'après les expériences de Schubler, l'évaporation pour les plantes irriguées est d'environ 200 grammes par mètre carré et par jour. Sur un hectare de riz, l'eau évaporée par les plantes dans une journée peut donc être évaluée à 20 mètres cubes.

L'évaporation de l'eau des rizières est très-considérable, comme celle de toutes les eaux presque stagnantes et peu profondes; elle atteint 12 à 15 millimètres par jour, ce qui fait 120 mètres cubes à l'hectare.

Ajoutez à cela une infiltration que l'expérience a montré être de 50 mètres cubes, vous arrivez à un total de 190 mètres cubes; restent seulement 100 mètres cubes par jour pour le renouvellement de l'eau stagnante répandue sur un hectare.

Pour obtenir une bonne récolte, il faut toujours maintenir chaude l'eau des rizières ; d'où la nécessité d'un renouvellement lent et d'une stagnation presque complète.

Les mauvaises herbes se développent rapidement dans les rizières et surtout dans les rizières anciennes dont la terre est épuisée ; il faut procéder à un et quelquefois à deux sarclages mensuels en mai, juin et juillet : ce travail est fait par des femmes et des enfants qui s'avancent en ligne sur toute la largeur du bassin, courbés et marchant dans l'eau.

Le développement de l'épi commence en juin et la maturité est complète vers la fin d'août ou les premiers jours de septembre. On cesse alors d'introduire de l'eau, mais la récolte se fait lorsque le sol est encore à l'état de vase.

La récolte de grain est de 35 à 45 hectolitres par hectare ; on met dans

les terres fortes 1 hectolitre de semence et on descend dans les terres faibles à 42 litres.

Insalubrité des rizières. — Les rizières présentent les caractères de véritables marais ; l'eau qui les recouvre est le siége d'une vaste fermentation animale et végétale ; à la surface nage une matière d'aspect glutineux qui tient emprisonnées des bulles de gaz ; une odeur nauséabonde se fait sentir au loin.

La proportion de la mortalité annuelle a beaucoup augmenté dans les parties du Portugal où s'est implantée la culture du riz.

Conclusion. — Si l'on substituait à la culture épuisante des rizières, dans l'irrigation desquelles on dépense une quantité d'eau très-considérable, d'autres cultures irriguées, semblables à celles de l'Espagne (céréales, maïs, haricots, pommes de terre), et si à côté de ces cultures on créait 4000 hectares de bonnes prairies bien assainies, bien irriguées et suffisamment fumées, la culture du Portugal y gagnerait beaucoup et la salubrité publique serait considérablement améliorée.

Telle est la conclusion formulée par M. de Andrade Corvo.

Rizières du nord de l'Italie. — Les rizières du nord de l'Italie ont une grande importance ; elles sont alimentées par de l'eau riche en principes nutritifs : aussi peuvent-elles être établies même sur de mauvais terrains et elles constituent dans ces conditions une excellente culture au point de vue économique. Le débouché du riz est toujours assuré, car le grain de cette graminée sert à la nourriture de plus de la moitié des hommes.

Dans le nord de l'Italie, le riz se sème au printemps ; il est recouvert d'une couche d'eau au sein de laquelle il se développe, protégé contre les vents et les influences atmosphériques. C'est à la fin de juin, quand la tige est à moitié de sa croissance et qu'elle a atteint une certaine vigueur, qu'on retire les eaux.

Pendant quelques jours, le végétal verdit et jaunit sous l'influence de la transition de l'humidité à la sécheresse, mais il reprend bientôt de nouvelles forces et entre dans la seconde période de son existence, pendant laquelle on lui redonne de l'eau à des intervalles qui vont sans cesse en augmentant.

Les rizières du nord de l'Italie sont établies par bassins horizontaux ; la nappe d'eau y est de $0^m,20$ à $0^m,30$ de hauteur ; il y a en général peu de terrassements à faire et de digues à construire, car on choisit de préférence des sols marécageux, analogues à ceux qui existent en grande quantité sur le littoral méditerranéen de la France et qu'on pourrait utiliser avantageusement de la même manière.

Le renouvellement de l'eau s'opère lentement dans ces bassins horizontaux, ainsi que nous l'avons expliqué tout à l'heure en parlant des rizières du Portugal.

Pour la commodité de la culture et de l'exploitation, les bassins ne doivent pas dépasser deux ou trois hectares de superficie.

Le riz est, avons-nous dit, semé au printemps, mars ou avril ; on sème le riz brut, non dépouillé de ses écorces ; la récolte se fait vers la fin de septembre ou les premiers jours d'octobre. On met les épis en bottes de $0^m,50$ de long et de 12 à 15 kilogrammes. Ces épis se battent très-facilement et abandonnent le riz brut, lequel possède plusieurs écorces brunes ou grises ; on les enlève, on procède au décorticage en soumettant les grains à l'action de pilons mus en général par une usine hydraulique.

Le produit moyen des rizières du nord de l'Italie est de 45 hectolitres de riz

brut, donnant 20 hectolitres de riz mondé ; l'hectolitre pèse 80 à 90 kilogrammes et le quintal se vend environ 55 francs.

C'est donc un produit très-rémunérateur, car il ne coûte pas à cultiver deux fois plus que le blé.

Les meilleures rizières de l'Italie ne sont pas les rizières perpétuelles qui, malgré la richesse des eaux, finissent par dégénérer, ce sont celles qui entrent dans de longs assolements ; pendant trois ou quatre ans, le sol est cultivé en riz et la terre inondée se trouve nettoyée ; elle est susceptible de fournir ensuite d'excellentes prairies.

La consommation de l'eau dans les rizières du nord de l'Italie est une consommation continue de 1 litre $\frac{1}{2}$ à 1 litre $\frac{3}{4}$ par seconde et par hectare, soit 130 à 150 mètres cubes par hectare et par jour.

En Portugal, nous trouvions 290 mètres cubes ; mais l'évaporation en Portugal est de $0^m,012$ par jour, elle n'est guère que de $0^m,002$ dans le nord de l'Italie. C'est une différence de 100 mètres cubes dans la consommation diurne, et, en annulant cette différence, on voit que les chiffres sont à peu près concordants.

La consommation de 1 litre $\frac{1}{2}$ ne s'applique qu'à des rizières établies sur un sol argileux et imperméable, où les pertes par filtration sont insensibles ; dès que celles-ci augmentent, il faut augmenter dans la même proportion la consommation de l'eau et les sols perméables sont impropres à la culture du riz.

Dans le nord de l'Italie, la culture du riz semble exercer une mauvaise influence sur la santé publique ; cette influence est incontestable, mais elle est évidemment moins sensible que sous un climat très-chaud comme celui du Portugal. Depuis le seizième siècle, époque de l'introduction du riz dans le Milanais, beaucoup de règlements prohibitifs ont été promulgués ; aujourd'hui encore, l'établissement des rizières doit être autorisé par l'administration ; on les reléguait autrefois à une certaine distance des villes, 2 ou 3 milles, mais il semble que la direction des vents régnants doit être prise en sérieuse considération.

L'influence malsaine des rizières paraît devoir être efficacement combattue par un régime tonique et par des soins assidus de propreté imposés aux cultivateurs.

Avec ces précautions, la culture du riz pourrait sans doute être avantageusement introduite dans certaines régions marécageuses du midi de la France. L'insalubrité de cette culture est du reste bien diminuée, quand on dispose de grandes quantités d'eau.

8° Irrigations des Pyrénées-Orientales. Reproduction des eaux

Les irrigations dans les Pyrénées-Orientales et particulièrement dans la vallée de la Tet ont été étudiées par M. l'ingénieur Vigan au point de vue de l'intéressant phénomène de la reproduction des eaux.

Il existe dans les parties basses de la susdite vallée, dans la plaine, d'anciens

canaux d'irrigation qui sont une richesse pour l'agriculture; les propriétaires des parties hautes de la vallée, de la montagne, demandèrent eux aussi à jouir des bienfaits de l'irrigation. Mais l'administration ne crut pas d'abord devoir accueillir leur demande parce qu'elle craignait de nuire aux canaux de la plaine.

Cependant, dès 1847, on avait énoncé le principe de la reproduction des eaux : « les arrosages de la montagne ne sont pas nuisibles, disait-on, à ceux de la plaine ; les terrains, arrosés abondamment au printemps, remplissent le rôle de réservoirs, et les eaux, que l'on y a ainsi emmagasinées à une époque où la rivière suffit largement à tous les besoins, s'en échappent, se reproduisent au moment de la pénurie en quantité suffisante pour compenser les pertes occasionnées par les arrosages d'été. »

M. Vigan fut chargé d'éclairer la question en ayant recours à des expériences sur l'écoulement et à des recherches géologiques, dans le détail desquelles nous n'entrerons pas et dont nous nous contenterons seulement de reproduire ici les conclusions :

« La reproduction des eaux, si l'on entend par là la formation ou l'alimentation des sources par les irrigations, s'effectue dans tous les terrains arrosés de la vallée de la Tet avec une énergie variable suivant le mode de culture, la figure du périmètre arrosé, la quantité d'eau employée aux arrosages dans chaque saison, l'épaisseur de la couche perméable, la composition de cette couche, la pente de la couche imperméable.

1° Dans les terrains, champs ou prés, à faible épaisseur de terre perméable ou peu éloignés de la rivière, quels que soient d'ailleurs les autres éléments, la reproduction agit avec une intensité très-faible.

Les arrosages d'été sur de pareils terrains donnent lieu à de très-fortes pertes.

2° Dans les terrains cultivés en champs, formant tout le long de la rivière une bande de 1200 à 1500 mètres de largeur, soumis au système d'assolement biennal en usage dans le pays et abondamment arrosés dès le 1er mars, à forte épaisseur de terre perméable inclinée, la reproduction paraît agir avec assez d'énergie pour compenser, au moins pendant la plus grande partie de la pénurie, les pertes provenant des irrigations.

La compensation serait plus parfaite si les canaux étaient réglementés au moment des grands arrosages d'août.

Il serait contraire aux intérêts de la plaine que la réglementation commençât avant le 10 août.

3° Dans les terrains, champs ou prés, formant tout le long de la rivière une bande de 3 à 4 kilomètres de largeur, à très-forte épaisseur de terre perméable, comme ceux des plaines du Roussillon, les eaux de reproduction n'apparaissent à la surface du sol que sur quelques points; la plus grande partie des sources qu'elles engendrent circule inutilisée dans le sous-sol et se rend directement à la mer. Sur ces terrains, l'arrosage occasionne des pertes considérables.

4° En général, dans les vallées secondaires, la reproduction ne s'effectue qu'au moyen des eaux absorbées pendant la pénurie, c'est-à-dire dans des conditions désavantageuses pour la plaine.

Pour quelques-unes d'entre elles cependant, l'ouverture de nouveaux canaux aura des conséquences salutaires pour la plaine en régularisant le régime des rivières.

Lors donc qu'une demande en concession d'eau sera présentée, on devra pro-

céder à la reconnaissance des terrains et à l'examen détaillé de chacun des éléments de la reproduction.

1° Si les terrains à arroser sont compris dans la première ou dans la troisième catégorie, on devra refuser la concession, ou tout au moins imposer la condition de fermer les vannes sur l'ordre du préfet, dès que l'eau commencera à manquer aux canaux inférieurs.

2° S'ils sont compris dans la deuxième catégorie, on pourra accorder la concession pleine et entière.

3° Lorsque les terrains ne seront pas assimilables à ceux des trois catégories étudiées dans le présent mémoire, il arrivera très-généralement, et nous en avons fait l'expérience dans le cours de notre exercice, que la solution naîtra du simple examen des lieux et du mode d'irrigation.

Ce n'est qu'exceptionnellement que l'on pourra conclure à la délivrance d'une concession non restreinte. »

CHAPITRE II

COLMATAGE

DÉFINITION DU COLMATAGE.

Lorsqu'on amène sur le sol des eaux troubles, plus ou moins chargées de vase, qu'on les laisse séjourner jusqu'à ce qu'elles soient clarifiées, elles abandonnent un dépôt d'alluvion qui exhausse le sol. Cette opération porte le nom de colmatage, du mot italien *colmare*, combler.

Pour se rendre compte de la puissance du colmatage, il suffit de considérer les quantités de matières solides tenues en suspension dans les principaux cours d'eau.

« L'eau exerce sur les formations géologiques qui la recueillent ou à travers lesquelles elle se fraye un passage, une action destructive constante, dont l'énergie est augmentée par la richesse des eaux de pluie en carbonate et en azotate d'ammoniaque. A côté de cette action chimique, interviennent les actions mécaniques dues au mouvement et à la désagrégation produite par les alternatives de chaleur et de froid. Les roches ainsi divisées se trouvent en partie dissoutes, en partie entraînées avec les eaux, des montagnes vers les plaines. Cet effet de corrosion des parties élevées au profit des parties plus basses se fait sans jamais s'interrompre. Suivant la hauteur de chute de l'eau, la ténacité ou la résistance des matières attaquées, les dépôts se produisent à une distance plus ou moins grande du point de départ. Les parties les plus grossières et les plus denses, qui se meuvent surtout au fond des courants, se séparent les premières à l'état de galets, de cailloux roulés, de gravier ou de sable. Les parties plus fines et plus ténues restent en suspension dans la masse d'eau tout entière et sont entraînées jusqu'à l'embouchure des fleuves où l'eau perdant sa force vive et le courant diminuant, ces matières se déposent et donnent naissance à ces vastes formations d'alluvions connues sous le nom de delta [1]. ».

Les quantités de matières en suspension dans les fleuves les plus chargés de troubles sont indiquées ci-après :

La puissance colmatante du *Gange* résulte du tableau suivant :

[1] Debize et Mérijot, *Chimie technologique.*

DÉSIGNATION DE LA SAISON.	DÉBIT PAR SECONDE.	POIDS DE MATIÈRE EN SUSPENSION PAR MÈTRE CUBE.	POIDS TOTAL ENTRAÎNÉ PAR SECONDE.	POIDS TOTAL ENTRAÎNÉ PAR MOIS.
	mèt. cub.	grammes.	kilogrammes.	tonnes.
Saison des pluies (4 mois).. .	14120	1943	2747	7,132,000
Saison d'hiver (5 mois). . . .	2034	446	906	2,356,000
Saison d'été (3 mois)..	1038	217	225	585,000

Cela fait par an environ 42 millions de tonnes ; si l'on admet pour les alluvions en culture une densité de 1700 kilogrammes, un colmatage de 0m,30 d'épaisseur exigera 500 kilogrammes de matière par mètre carré.

Avec le produit du Gange, on pourra donc colmater annuellement 84 millions de mètres carrés, soit 8400 hectares.

Le *Mississipi* contient 803 grammes d'éléments fixes par mètre cube en moyenne, et conduit à la mer annuellement 222 millions de mètres cubes de matières solides.

Le *Fleuve Jaune* contient 5 kilogrammes de matières solides par mètre cube et en jette à la mer annuellement près de 1000 millions de mètres cubes.

Le *Nil*, au Caire, renferme 1 kilogr. 58 de matières solides par mètre cube, et en emporte 4 mètres cubes 1/3 par seconde, soit 377,000 mètres cubes par jour.

Le *Rhin*, à Bonn, en mars 1851, à la suite d'une forte crue, renfermait 205 grammes de matières solides par mètre cube ; en mars 1852, à la suite d'une longue sécheresse, il n'en renfermait que 17 grammes.

La composition des alluvions varie évidemment avec la nature géologique des errains traversés.

Expériences de M. Hervé-Mangon. Dans ses Mémoires sur les limons charriés par les cours d'eau, M. l'ingénieur en chef Hervé-Mangon, membre de l'Institut, a donné le résultat de ses longues expériences sur ce sujet si intéressant.

1° *Limons de la Durance.* La quantité de matières solides entraînées par mètre cube a varié, pendant le cours d'une année, de 199 grammes à 3633 grammes et la moyenne annuelle est de 1454 grammes par mètre cube.

Pour un débit total de plus de 12 milliards de mètres cubes, cela fait un poids de plus de 17,700,000 tonnes et, en admettant une densité de 1600 kilogrammes, c'est un volume de 11 millions de mètres cubes par an, permettant de colmater 33 millions de mètres carrés ou 3300 hectares.

La composition chimique de ces limons a varié dans les limites suivantes :

	Pour 100.		
Résidu argilo-siliceux insoluble dans les acides faibles. .	40	à	51
Alumine et peroxyde de fer.	4,25	à	5,65
Carbonate de chaux..	36,25	à	48,13
Azote.	0,071	à	0,128
Carbone.	0,470	à	0,658
Eau combinée et produits non dosés.	5,624	à	6,955

2° *Limons de la Loire.* Par mètre cube d'eau passant au pont de Tours, la Loire renfermait les poids de limon suivants :

	Grammes.		Grammes.
30 décembre 1859 au 3 janvier 1860. .	319	11 au 18 décembre..	114
8 au 11 janvier.	467	28 décembre 1860 au 8 janvier 1861. .	119
30 janvier au 7 février..	169	16 au 18 mars 1861..	169
1er au 7 mars..	193	22 au 28 mars 1861..	92
9 au 12 avril.	231	29 au 31 mars 1861.	60

Du 8 au 11 janvier 1860, la Loire entraînait au pont de Tours 29 423 mètres cubes de matières solides par 24 heures.

3° *Limons du Var.* Les expériences sur les limons du Var, exécutées avec le concours de M. l'ingénieur Vigan, ont conduit aux chiffres du tableau suivant :

PÉRIODES.	DÉBIT EN MILLIERS DE MÈTR. CUBES.	POIDS MOYEN DE LIMON PAR MÈT. CUBE.	PÉRIODES.	DÉBIT EN MILLIERS DE MÈTR. CUBES.	POIDS MOYEN DE LIMON PAR MÈT. CUBE.
		grammes.			grammes.
Septembre 1864..	77,760	740	Mars 1865.. . . .	120,096	375
Octobre.	1,539,648	8499	Avril.	183,168	592
Novembre. . . .	1,399,680	545	Mai..	238,464	521
Décembre.. . . .	695,520	270	Juin.	260,496	11157
Janvier 1865. . .	85,968	52	Juillet.	163,296	1672
Février.	102,816	53	Août.	87,696	2229

Le poids moyen de limon contenu dans un mètre cube d'eau du Var est donc de 3 kilogr. 577, proportion deux fois et demie plus forte que celle qu'on trouve dans la Durance.

4° *Limons de la Marne.* Le poids total de limon entraîné par la Marne dans l'année, 1er novembre 1863 à 31 octobre 1864, s'est élevé à 181,619 tonnes, soit 74 grammes par mètre cube en moyenne.

Le minimum du poids des troubles par mètre cube a été de 2 grammes et le maximum 515 grammes.

Ces limons sont très-riches en matières organiques et en azote.

5° *Limons de la Seine.* Les eaux d'essai étaient prises au Port-à-l'Anglais, à l'amont de la Marne.

De novembre 1863 à octobre 1866, le poids moyen de limon contenu dans un mètre cube d'eau de Seine a été de 39 gr., 6.

Le poids le plus faible a été de.	1g,35
Et le plus fort.	2738g,00

Les eaux claires renferment encore 10 grammes de matières solides.

Le poids moyen des matières solides entraînées en un an a été de 207,000 tonnes, soit 130,000 mètres cubes.

Si l'on en excepte les rivières torrentielles, toutes choses égales d'ailleurs, l'eau des rivières qui traversent des pays déserts ou peu habités est beaucoup moins riche en matières solides que l'eau de celles qui arrosent des pays populeux.

Dans les rivières à marée, comme la Tamise, la proportion de matières solides augmente avec le flux parce que l'écoulement des eaux douces est ralenti, elle diminue avec le reflux.

DE L'UTILITÉ DU COLMATAGE.

Les eaux travaillent sans cesse à niveler la surface de la terre, en enlevant la chair des montagnes pour la porter dans les parties basses des vallées.

C'est par ce phénomène que la nature a produit ces plaines d'alluvions dont la fertilité est proverbiale.

Il appartient à l'homme d'imiter la nature et de ne point laisser ensevelir dans la mer ces masses énormes de matières fertilisantes dont nos cours d'eau sont chargés.

L'importance de ces matières a été parfaitement exprimée dans les lignes suivantes par M. Mille, inspecteur général des ponts et chaussées :

« Pour nous, le type de l'éternelle fécondité c'est l'inondation du Nil. De même, dans nos pays, les terres les plus riches sont les alluvions colmatées, baignées par les crues. Qu'est-ce que le val de la Loire, sinon le don du fleuve comme l'Égypte est le don du Nil ? Et pourtant, la proportion des troubles est moins forte que dans les eaux d'égout.

Dans l'ancienne Rome, on ne voit aucun exemple d'application de ces eaux. La *cloaca maxima* versait directement au Tibre l'eau des quatorze aqueducs. Le progrès vient avec les Arabes qui ont apporté en Europe l'irrigation. L'Arabe avait vu dans le désert l'eau changer le sable en oasis de verdure. Devenu en Espagne civilisé et instruit, il imagina les barrages en rivière, l'utilisation de la pente, les canaux d'arrosage ; l'irrigation s'étendit sur la côte occidentale de la Méditerranée, depuis l'Andalousie jusqu'au Roussillon. La conquête chrétienne au treizième siècle trouva la plaine de Valence arrosée par sept dérivations du Xucar ; en même temps l'usage existait en ville d'envoyer au ruisseau public, par des conduites en poterie ou en briques, toutes les eaux sales de l'habitation. L'infection grandissant avec la population, le conquérant don Jayme d'Aragon ordonna que chaque jour, le canal de Cuart, l'une des sept branches de la plaine, coulerait pendant deux heures sur vingt-quatre, pour laver les égouts. Il sortait ainsi de la ville un ruisseau fangeux qui se rendait à la mer. Près des murs, les riverains retirèrent d'abord le fumier et la boue qui, desséchés au soleil sur la berge, devenaient de l'engrais ; puis, plus loin, ils barrèrent le courant et l'obligèrent à passer dans leurs rigoles de culture. Le résultat fut que dans la huerta de Valence, citée avec raison comme une merveille, la portion la plus riche borde aujourd'hui le canal trouble qui porte avec lui l'eau et l'engrais.

Prairies du Milanais. — A Milan, les circonstances furent semblables ; Milan, tête de la Lombardie au moyen âge, avait une ceinture de fossés dans lesquels on envoyait les immondices des rues et les résidus des fabriques de laine. Le courant s'écoulait vers le Pô par un vieux lit, le Vettabia, qui traversait les terres de l'abbaye de Chiaravalle (Clairvaux) occupée par les moines de Cîteaux. La tradition veut que ce soit saint Bernard lui-même qui ait eu l'idée de jeter ces eaux grasses et impures sur les prés de l'abbaye. L'effet fut excellent. Il augmenta quand on y joignit l'eau des *fontanili*, sources artésiennes qui circulent sous le gravier de la plaine ; puis quand François Sforza, au treizième siècle, après avoir dérivé de l'Adda le canal de Martesana, attribua un mètre cube par seconde et par jour au lavage des égouts de Milan, l'irrigation s'étendit alors sur environ 1500 hectares : l'industrie et le travail sans repos du paysan lom-

bard y créèrent les marcites, prairies qui donnent jusqu'à huit coupes par an, nourrissent trois vaches laitières par hectare, et sont devenues le point d'appui de la fabrication du fromage parmesan.

Prairies d'Édimbourg. — A Édimbourg, les prairies d'irrigation, les *craigentinny meadows*, datent du commencement du siècle ; elles parurent après l'arrivée à la ville des sources de Crawley. Un ruisseau, le Foulburn, qui passe sous Holyrood, emportait à la mer le produit des égouts. Il y avait de la pente, on fit des barrages ; l'eau inonda les sables, les couvrit de verdure, et l'on eut, là encore, une fabrique de nourriture verte pour les vaches laitières. Ces faits séparés par le temps et la distance s'observèrent quand les deux villes qui dirigent le mouvement en Europe, Londres et Paris, furent en face d'une grande difficulté : l'assainissement de la rivière. »

PRATIQUE DU COLMATAGE.

Le colmatage s'opère en introduisant les eaux troubles dans des bassins où elles ne se trouvent animées que de faibles vitesses et où par conséquent elle. abandonnent les particules solides qu'elles tiennent en suspension.

On n'a pas encore déterminé la loi suivant laquelle une eau trouble se clarifie ; le temps nécessaire à la clarification est-il proportionnel à la hauteur ? Cela ne paraît guère probable, eu égard à ce qui se passe tous les jours sous nos yeux : nous savons en effet combien la clarification d'une eau trouble est lente à s'achever lorsque les parcelles solides arrivent à se concentrer dans les parties inférieures du vase. A mesure que ces parcelles descendent, elles épaississent le liquide qui, par suite, oppose à leur mouvement une résistance croissante.

D'après quelques expériences, M. l'ingénieur Choron pense qu'on pourrait adopter pour exprimer la durée de la clarification en fonction de la hauteur la formule

$$mH + nH^2$$

dans laquelle le coefficient numérique n n'aurait qu'une faible valeur.

Quoi qu'il en soit, supposons qu'il s'agisse de recouvrir un sol *ab*, figure 1 planche XXIII, d'une couche de colmatage de hauteur *h*. Deux méthodes sont possibles : 1° On peut remplir le bassin d'une hauteur d'eau H, la laisser se clarifier complètement, puis la décanter et la remplacer par une autre, pour laquelle on opérera de même ;

2° Ou bien, on peut remplir d'eau le bassin jusqu'à la hauteur H ; puis, quand cette eau s'est éclaircie sur une petite hauteur x, expulser la tranche claire et la remplacer par une tranche trouble. En admettant que la hauteur x soit aussi faible que possible, cela revient à dire que le bassin sera alimenté d'une manière continue. L'eau trouble arrivera d'un côté et l'eau claire s'en ira de l'autre en passant en tranche mince sur un déversoir. Si l'on veut n'expulser que de l'eau claire, on devra régler par l'expérience le débit de la vanne d'alimentation, débit qui dépendra de la superficie du bassin et de la vitesse de clarification de l'eau.

Au moyen d'essais préalables opérés sur des vases en verre, cette vitesse

pourrait être évaluée et le débit serait calculé à l'avance ; si l'on avait à procéder à d'importants travaux de colmatage, il conviendrait de se livrer d'abord à des expériences de ce genre.

Nous sommes donc en présence de deux systèmes : l'alimentation intermittente et l'alimentation continue.

Lequel faut-il préférer ?

Il est évident, en premier lieu, que ces deux systèmes consomment le même volume d'eau trouble pour produire la même épaisseur d'alluvion h.

Si α désigne la puissance colmatante des eaux, c'est-à-dire la hauteur de dépôts qu'abandonne sur le sol par sa clarification une tranche de 1 mètre de hauteur, une tranche d'eau de hauteur H élèvera le sol de la quantité αH. Pour produire une élévation d'une hauteur h il faudra par mètre carré autant de mètres cubes d'eau qu'il y a d'unités dans le rapport $\left(\frac{h}{\alpha}\right)$.

Sous le rapport de la consommation d'eau, les deux systèmes sont donc équivalents; mais la question de la consommation d'eau est peu de chose, parce qu'en général on a plus d'eau qu'il n'en faut.

Ce qui importe, avant tout, c'est de colmater le plus rapidement possible, c'est de mettre les terres en culture aussitôt que possible afin de tirer parti du capital dépensé.

La méthode à adopter est donc celle qui conduit le plus vite au résultat.

Si l'on connaissait la loi des vitesses de clarification par rapport aux hauteurs d'eau, il serait facile de déterminer mathématiquement la plus avantageuse des deux méthodes.

Cette loi est inconnue et, du reste, elle est inutile pour trancher la question.

Considérez une tranche d'eau de hauteur H, il lui faudra un certain temps pour se clarifier complètement ; si, lorsqu'elle est déjà clarifiée seulement sur la hauteur x, vous enlevez cette tranche claire et la remplacez par de l'eau trouble, la concentration des vases contenues dans la hauteur H primitive continuera au-dessous de la profondeur x comme s'il n'y avait point d'eau trouble au-dessus d'elle ; pendant ce temps, cette eau trouble supérieure se concentrera de son côté. On comprend que cet effet sera d'autant plus sensible que la tranche x sera plus faible ; ce qui revient à dire que le colmatage le plus rapide est celui qui se fait par une alimentation continue. L'alimentation continue entraîne l'expulsion continue des eaux clarifiées.

Calcul des canaux d'irrigation et de colmatage. Dans notre traité d'hydraulique, nous avons donné les formules relatives au calcul des canaux à section et à pente uniforme. Nous ne pouvons revenir ici sur ces calculs. Nous rappellerons seulement que les profils doivent être établis autant que possible de manière à fournir le cube minimum de terrassements. Il faut aussi que les pentes ne soient pas assez fortes pour que la vitesse des eaux attaque les berges, ni assez faibles pour que le limon des eaux se dépose dans les canaux.

COLMATAGES D'ITALIE.

C'est en Italie que les colmatages artificiels paraissent avoir eu leur origine. On en trouve la trace jusque dans ces vers d'Horace :

.....Sterilisque diù palus, aptaque remis
Vicinas urbes alit, et grave sentit aratrum.

Dans son ouvrage sur les marais Pontins, de Prony signale l'importance du colmatage.

Quand on a reconnu, dit-il, la grande influence de l'action des fleuves, des torrents descendus des montagnes, sur la formation des marais, le premier expédient qui se présente à l'esprit, pour en opérer le desséchement, est d'employer ces mêmes courants d'eau chargée de limon, afin d'exhausser le terrain par des dépôts et des atterrissements successifs et régulièrement formés. Cette méthode des desséchements par *colmates* est employée en Italie avec beaucoup d'adresse et de succès, et l'on en a fait de fort heureuses applications, dans le *Val di Chiana*, sur les terrains qui avoisinent le bas Pô et ailleurs ; malheureusement, elle n'offre dans les marais Pontins qu'une ressource secondaire et d'un effet très-lent : la chair des montagnes est presque épuisée : les eaux n'en détachent plus, en général, que des graviers, des cailloux et des blocs de rocher.

Le succès de l'emploi de la méthode des *colmates* [1], dit-il ailleurs, tient principalement à la promptitude avec laquelle on expulse, du terrain qu'on se se propose d'exhausser par alluvion, les eaux limoneuses qui y ont été introduites, lorsque ces eaux, ayant déposé leur limon, sont devenues claires. C'est par la rapidité de cet écoulement qu'on se procure le double avantage de renouveler le plus souvent qu'il est possible, pendant un temps donné, les eaux troubles sur la surface du sol à colmater, et de réduire à rien ou à très-peu de chose le mélange de ces eaux troubles avec les eaux déjà clarifiées.

Il est donc manifeste que l'établissement d'un système de *colmates* suppose l'établissement préliminaire d'un système d'écoulement, et que la réussite du premier dépend abolument de la perfection du second ; bien entendu que les eaux destinées à former les alluvions satisfont encore à d'autres conditions indispensables.

Colmatage du val de Chiana. Le val de Chiana se trouve dans l'ancienne Toscane, il s'étend depuis Avezzo, sur l'Arno, jusque près d'Orvieto, non loin du Tibre ; sa longueur est de 85 kilomètres et sa largeur de 5 kilomètres.

Ce pays était florissant dans l'antiquité ; mais, abandonné à lui-même au temps des guerres civiles du moyen âge, il se transforma en marécage.

On observa, dit M. Baumgarten dans son mémoire sur les desséchements et irrigations en Italie, on observa que les affluents de la Chiana, par le dépôt des vases qu'ils charriaient, exhaussaient ces terrains marécageux, et l'on en profita pour les améliorer, sans prévoir que l'on en ferait un système qui fertiliserait un jour toute la contrée.

Au XVII[e] siècle, l'assainissement du val de Chiana donna lieu à de grandes discussions entre les hydrauliciens de l'époque : Galilée, Castelli, Torricelli. Ce dernier préconisa le système du colmatage, qui fut appliqué par Hippolyte et Jules de Médicis ; Jules de Médicis fut élu pape en 1523 sous le nom de Clément VII.

Le colmatage produisit dans le val de merveilleux effets, et, en 1740, ce pays était renommé par l'abondance de sa population et la richesse de sa culture qui donnait les fruits les plus recherchés.

Cependant, il y avait bien encore des perfectionnements à faire et on se trouvait

[1] De Prony emploie le mot colmate dans le sens que nous donnons au mot colmatage. *Colmare* veut dire combler. Une colmate doit s'entendre d'une terre colmatée, d'une terre pour laquelle l'opération du colmatage est achevée.

dans l'embarras pour faire écouler, sans inconvénients, les eaux des affluents qui continuent à charrier un limon dont on n'avait plus besoin.

Il y avait un moyen de remédier à cela, c'était de colmater sur une assez grande hauteur une partie de la vallée haute, de manière à créer une pente suffisante pour l'écoulement; mais de la sorte, on rendait improductifs pendant de longues années d'excellents terrains, qu'on avait peut-être eu le tort autrefois de mettre en culture avant qu'ils fussent suffisamment exhaussés au-dessus des terrains d'aval.

On s'arrêta à un autre projet, celui de M. Manetti, ancien élève de l'École polytechnique et de l'École des ponts et chaussées de France. Ce projet a consisté à créer à droite et à gauche du lit principal de la Chiana un lit séparé pour recevoir toutes les eaux troubles des affluents qui ne se réunissent ainsi à la Chiana qu'à Porto a Cesa, de telle sorte qu'en amont de ce point la Chiana ne reçoit que peu d'eau et des eaux claires; les deux dérivations latérales auxquelles on a pu donner une pente plus considérable sont chargées de débiter toutes les eaux troubles. On a amélioré aussi la partie inférieure de la Chiana en abaissant de $4^m,10$ l'ancien barrage des moines.

Ces travaux ont produit des résultats très-heureux.

Quelques personnes avaient conçu la crainte que l'écoulement plus facile et plus prompt des eaux de la Chiana n'augmentât la hauteur des crues de l'Arno à Florence. Cette crainte était chimérique, car l'Arno a une pente de 3 mètres par kilomètre en amont du confluent de la Chiana, tandis que celle-ci n'a qu'une pente de $0^m,65$ à 0,35 par kilomètre; les eaux des crues de l'Arno auront donc passé depuis longtemps sous les ponts de Florence quand les crues de la Chiana y arriveront. C'est en effet ce que l'expérience a démontré.

Assainissement de la Maremme Toscane. Colmatage du marais de Castiglione. On appelle Maremme Toscane, dit M. l'ingénieur Baumgarten, cette partie du littoral de la Méditerranée qui s'étend de la limite des anciens États pontificaux jusqu'à quelques kilomètres de Livourne; sa largeur atteint quelquefois 16 à 24 kilomètres jusqu'au pied des collines. Sa fertilité est si grande qu'en quelques points les grains semés rendent quinze et vingt fois leur poids; mais cette contrée a de tout temps été malsaine et infectée par les fièvres, à cause des marais qu'elle renferme.

Il est à supposer que ces marais proviennent d'anciens golfes, au devant desquels les vagues de la mer ont formé des monticules de sables, ce qui a donné lieu à des étangs salés qui ont été convertis en marais, par suite du défaut d'une libre communication avec la mer, et des inondations plus fréquentes auxquelles le pays a été soumis par suite de l'allongement du cours des fleuves dont la pente était ainsi diminuée; car, dans le moyen âge, les guerres intestines empêchèrent les populations de faire aucun travail pour atténuer ces effets naturels. C'est ainsi que les marais de Castiglione, près Grosseto, devenus le foyer d'infection des Maremmes, étaient d'abord un golfe, puis un lac transformé en marais par les eaux troubles de l'Ombrone. Ce fleuve s'étant détourné vers la mer, le comblement du marais cessa; sans cela cette contrée serait depuis longtemps bonifiée.

Côme de Médicis fit ouvrir un canal navigable, le canal de Ximénès, de la Ceretta à Castiglione (planche XXI, figures 4 et 5).

En 1788, on proposa de détourner l'Ombrone dans le marais. Mais ce projet ne fut exécuté que sous le grand-duc Léopold II. On s'attacha d'abord à ne jamais admettre un mélange d'eau de mer et d'eau douce, car ce mélange,

exposé au soleil sur une faible profondeur, donne lieu à des exhalaisons pestilentielles en faisant pourrir les plantes qui y poussent. On exécuta donc des vannages destinés à empêcher les eaux de la mer de pénétrer dans le marais lorsque leur niveau est supérieur à celui des eaux intérieures.

Les eaux troubles pour le colmatage furent empruntées à l'Ombrone, fleuve important dont le cours tortueux est parallèle au marais, à 5 kilomètres à l'est.

Un premier canal de dérivation fut construit, ayant son origine au nord de Grosseto près Buccace, d'une longueur de plus de 8 kilomètres, pouvant débiter en moyenne 140 mètres à la seconde et 469 mètres en temps de crue.

On lui adjoignit bientôt un second canal de dérivation, de 5 kilomètres de longueur, ayant son origine au sud de Grosseto, pouvant débiter 76 mètres en moyenne et 206 mètres en crue.

L'Ombrone est un fleuve de 120 mètres de large, présentant des crues de 7 mètres au-dessus de l'étiage ; aussi la construction des barrages de dérivation présente-t-elle de sérieuses difficultés.

Les eaux ne sont rendues à la mer que lorsqu'elles ont déposé tout leur limon et qu'elles sont parfaitement claires; on se servit pour cela d'abord du canal Ximénès élargi, puis de deux émissaires directs, les canaux de Saint-Léopold et de Saint-Roch, figure 5.

L'expérience a montré que, pour avoir des terrains susceptibles d'une bonne culture, il suffisait d'élever le sol en chaque point à une hauteur h au-dessus du niveau de la mer, telle que

$$h = 1^m,5 + \frac{d}{10000},$$

d étant la plus courte distance du point considéré à la mer.

Le profil en long du marais montre que le point le plus élevé auquel il faut porter le colmatage est à $3^m,10$ au-dessus du niveau de la mer ; le lit de l'Ombrone à Buccace étant à la cote $9^m,09$, cela fait, sur une longueur de 15 kilomètres, une pente de $0^m,40$ par kilomètre, suffisante pour porter les eaux troubles au point le plus défavorable.

L'opération du colmatage marcha beaucoup moins vite qu'on ne l'espérait, car il y a beaucoup de temps perdu pour les travaux accessoires, exécution des digues et canaux, terrassements pour répartir les dépôts, etc.

Au bout de dix-neuf ans de travaux, il y avait 546 hectares en culture et 1,092 hectares prêts à recevoir la semence. Le reste des 8,110 hectares était presque assez élevé pour l'assainissement, mais non assez pour la culture.

COLMATAGES DE LA RIVE GAUCHE DU VAR.

Au siècle dernier, le Var avait un cours régulier entre deux rives fixes. On pense que c'est à la suite du déboisement des montagnes et aussi du déboisement des rives, qu'il a commencé à ronger ses rives et à divaguer dans la vallée, détruisant sur son passage les alluvions les plus fertiles.

Le premier projet d'endiguement, dressé par les ingénieurs sardes, date de 1825; des concessionnaires se présentèrent en 1844 pour l'exécution de ce

projet, mais les fonds leur manquèrent et ils durent s'arrêter. Après diverses péripéties, les travaux ne furent sérieusement repris qu'en 1860, et c'est le gouvernement français qui les a achevés.

M. Vigan, ingénieur des ponts et chaussées, a décrit ces travaux dans un Mémoire historique et technique sur l'endiguement et le colmatage de la rive gauche du Var, mémoire inséré aux Annales des ponts et chaussées de 1872 et dans lequel nous avons puisé les dessins de la planche XXVI et les renseignements qui vont suivre.

La figure 9 donne le plan général de l'endiguement : la ligne noire pleine représente la digue principale de la rive gauche, et les bassins d'atterrissement sont indiqués par des lignes transversales.

La digue principale, dont la coupe est donnée par les figures 5 et 6, est élevée à 4 mètres et 5 mètres au-dessus de l'étiage, c'est-à-dire à $1^m,50$ au-dessus du niveau admis pour les plus hautes eaux.

La largeur en couronnement est de 7 mètres pour la partie empruntée par la route nationale ; elle n'est que de 5,90 à l'aval du raccordement avec la route. Le talus extérieur en terre est à 1 1/2 de base pour 1 de hauteur ; le talus intérieur est à 45° avec revêtement en pierres sèches de $0^m,50$ d'épaisseur, et avec enrochements à la base, dont le cube avait été fixé à 4 mètres cubes par mètre courant ; ce volume paraît devoir s'élever à 8 mètres dans l'avenir lorsque les enrochements auront été convenablement nourris.

Le volume des blocs était fixé entre $0^m,20$ et 1 mètre, et il était constaté par un pesage à la bascule, la densité admise étant de 2660.

Un chemin de fer placé sur la digue, à 1 mètre de l'arête du perré, servait au transport des matériaux.

Il ne suffisait pas d'endiguer la rivière principale, il fallait aussi endiguer les affluents dans la partie en plaine, afin de les empêcher de répandre leurs eaux sur les graviers à colmater. Les ingénieurs sardes n'avaient d'abord prévu qu'une digue sur la rive gauche, c'est-à-dire sur la rive d'aval des affluents ; mais une seule digue était insuffisante, car les bassins d'amont eussent été envahis par les graviers lors des crues. En exécution, on endigua les deux rives ; les digues comprennent un remblai en gravier soutenu par un mur en maçonnerie avec fruit extérieur de $\frac{1}{8}$; la largeur en couronne est de $1^m,70$. La hauteur à l'origine est de 4 mètres au-dessus de l'étiage du Var ; le couronnement devait rester horizontal jusqu'au pied des versants, et là les digues devaient se relever parallèlement au lit des torrents pour aller s'enraciner dans les berges solides. Mais on réfléchit que, lorsque la partie horizontale des torrents serait endiguée, elle se trouverait dans la même situation que le lit supérieur et que le plafond s'élèverait, de manière à prolonger la pente de ce lit supérieur ; c'est en effet ce que l'expérience a démontré. La pente était voisine de $0^m,027$ par mètre ; on résolut donc de remblayer immédiatement le plafond et de l'établir suivant cette pente. Quant au couronnement des digues latérales, on le laissait horizontal jusqu'à ce que la revanche de la digue par rapport au niveau des plus hautes eaux eût atteint le minimum admis ; à partir de là, le couronnement était établi parallèlement au lit.

Ce système fut, en effet, adopté pour tous les petits torrents ; pour les grands qui eussent exigé des terrassements coûteux, on préféra laisser à l'avenir la charge de surélever les digues ou d'enlever les dépôts.

Les figures 7 et 8 représentent les dispositions des bassins de colmatage. Les levées de colmatage, espacées de 100 mètres dans le sens de la pente de la

vallée, devaient, d'après les ingénieurs sardes, être constituées d'un massif de gravier ayant 2 mètres de hauteur et 1 mètre de largeur en couronne ; un pertuis devait être ménagé dans chaque levée près de la digue principale, et une autre levée semblable devait suivre le contour des terrains à colmater. En exécution, on a reconnu qu'un seul pertuis était insuffisant et on en a établi deux, trois et jusqu'à quatre. La largeur en couronne a été réduite de $0^{m},20$. Quant à la hauteur, elle est réglée d'après les principes suivants :

Ce qu'on voulait obtenir, c'était une couche de colmatage égale au moins à $0^{m},30$ sur toute la surface des graviers ; cette épaisseur de $0^{m},30$ est considérée comme suffisante pour une bonne culture. On s'est imposé la condition qu'il n'y eût à l'arrière des digues aucune partie des graviers située à moins de $0^{m},60$ en contre-bas du couronnement ; il reste encore une revanche de $0^{m},30$ entre le couronnement et le niveau du terrain complètement colmaté. Pour éviter la destruction des digues par les petites vagues, le niveau de l'eau doit être maintenu à $0^{m},20$ en contre-bas du couronnement, ce qui laisse une épaisseur de $0^{m},10$ pour la tranche d'eau surmontant le niveau définitif du sol. L'expérience a montré que ces dispositions donnaient de bons résultats.

Pour faciliter l'opération, on dérasait les éminences des bassins de gravier et on se servait du produit de ces déblais pour établir les levées.

Quand l'inclinaison des graviers dans le sens transversal de la vallée était notable, on créait deux étages de levées comme le montre la figure 7.

M. Vigan explique comme il suit la manière dont on procède à l'opération du colmatage :

« *Introduction des eaux et manœuvre des poutrelles.* — L'introduction des eaux troubles dans les bassins s'opère au moyen de barrages de déviation établis immédiatement à l'aval de chaque prise d'eau obliquement sur la direction de la digue principale.

Ces barrages sont formés de deux ou trois rangs de pieux moisés, de 3 à 4 mètres de fiche, de 1 mètre à $1^{m},50$ de saillie au-dessus des graviers ; l'intervalle est garni de moellons ; à l'aval sont posés des blocs d'un fort volume pour prévenir les affouillements.

Le couronnement est incliné en glacis de l'amont à l'aval.

A l'origine des travaux et pendant de longues années à la suite, on construisait les barrages avec des piquets de 2 mètres environ de longueur reliés sur la partie hors de l'eau par des fascinages et garnis par derrière d'une petite levée de gravier.

Ces dispositions étaient plus économiques au point de vue des frais de premier établissement ; mais, à chaque crue, les ouvrages étaient emportés ; il fallait donc y revenir à plusieurs fois, et nous avons reconnu que, tout compte fait, il était préférable de se placer de prime abord dans des conditions plus stables.

Les eaux une fois introduites dans les bassins, on les laisse courir derrière la digue entre les pertuis qui en longent le pied.

Le seuil de ces pertuis est établi au niveau de l'étiage du Var, et comme généralement les graviers se trouvent à $0^{m},80$ au-dessus de ce niveau, il s'ensuit que presque partout, d'un pertuis à l'autre, il règne un fossé de $0^{m},80$ de profondeur, dans lequel sont contenues les eaux déviées.

Sur quelques points où les graviers ne présentent pas une saillie aussi forte, les eaux s'épanchent librement sur des surfaces plus ou moins grandes.

Lorsqu'elles sont arrivées au dernier des bassins de la série qu'elles sont appelées à colmater, on place les poutrelles aux pertuis de la digue en aval de ce bassin.

Le gonflement se produit ; le bassin est inondé ; les eaux perdent leur vitesse et le limon se dépose.

Les poutrelles ne sont pas placées d'un seul coup sur toute la hauteur des pertuis ; il est utile, pour éviter de forts tassements dans les levées en gravier, de les soumettre à des pressions successivement croissantes. On commence donc par poser la moitié des poutrelles de façon à inonder seulement les parties les plus basses du terrain ; ce n'est qu'après ce comblement préparatoire des dépressions des bassins que l'on fait affluer les eaux jusqu'au niveau maximum qu'elles doivent atteindre, c'est-à-dire jusqu'à $0^{m},20$ en contre-bas du couronnement des levées.

Les pertuis d'une même levée ne doivent pas être barrés constamment à la même hauteur. Autrement, les eaux arrivant par le fossé dans le bassin ne conserveraient pas une vitesse suffisante pour charrier le limon jusqu'au pertuis de la montagne ; les dépôts s'entasseraient dans la région voisine de la digue ; leur épaisseur irait toujours en diminuant à mesure qu'on s'en éloignerait.

Il faut donc avoir soin de tenir alternativement le déversoir de chacun des pertuis plus bas que l'autre, ou que les deux autres lorsqu'il y en a trois sur une levée ; le bassin se trouve alors sillonné de courants qui répartissent uniformément les dépôts à la surface.

Lorsqu'on juge que le dernier bassin est suffisamment colmaté, on passe à l'avant-dernier et successivement à chacun des autres, en remontant vers la prise d'eau.

On n'opère pas toujours absolument comme nous venons de le décrire, par bassin isolé ; lorsque les eaux sont très-troubles, on ne les dépouille entièrement de leur limon qu'en les faisant séjourner successivement dans cinq ou six bassins.

Ce procédé de colmatage, qui consiste à marcher de l'aval vers l'amont, a pour principal avantage de laisser toujours une entrée libre aux eaux troubles ; en commençant l'opération par les bassins les plus voisins de la prise d'eau, on provoquerait l'engorgement des canaux d'amenée et même du bief du barrage de déviation, et il faudrait, à des intervalles rapprochés, ouvrir un passage aux eaux vers les bassins inférieurs. »

Les analyses des eaux du Var, répétées pendant une année, de septembre 1864 à septembre 1865, ont montré que les époques les plus convenables pour le colmatage étaient juin et octobre.

En juin, c'est la fonte des neiges, en octobre, ce sont les pluies d'automne qui ravinent le sol profondément et augmentent la proportion de vase contenue dans les eaux du Var.

En juin 1865, le poids des troubles a atteint 37 kilogrammes par mètre cube d'eau.

En janvier 1865, ce poids est descendu à 9 grammes par mètre cube.

Le poids des troubles entraînés par le Var dans une année dépasse 19 millions de tonnes et est environ de 12 millions de mètres cubes, si on admet que le poids spécifique de l'alluvion desséchée est de 1600 kilogrammes.

Avec ce volume, on recouvrirait en une année une surface de 4000 hectares d'une couche arable de $0^{m},30$.

Une dérivation de 1 mètre cube par seconde colmaterait en une année 7 à 8 hectares.

Les prises d'eau sont disposées de telle sorte qu'elles donnent au moins un mètre cube par seconde pour 30 hectares ; cela fait donc 4 années pour colmater toute la surface. Mais, à cause des pertes d'eau trouble, des défauts de nivellement des bassins, il faut porter à 6 années la période de colmatage.

La composition chimique des limons du Var conduit à la moyenne suivante :

	Mèt. cubes.
Résidu insoluble dans les acides	45,00
Alumine et peroxyde de fer	5,00
Carbonate de chaux	40,00
Azote	0,10
Eau combinée, carbone et autres matières organiques non dosées	9,90
	100,00

Pendant les travaux de colmatage, les fièvres paludéennes se développent dans la contrée et surtout parmi les ouvriers des chantiers. C'est, heureusement, un mal transitoire, car l'opération, une fois achevée, aura en réalité amélioré considérablement les conditions hygiéniques du pays et entraînera la disparition des fièvres endémiques.

Les bassins de colmatage sont de véritables marais : une active fermentation des matières organiques s'y développe pendant les chaleurs et dégage des miasmes abondants. On peut en combattre l'effet par une hygiène bien entendue : propreté du corps et du logis, nourriture de qualité convenable et boissons toniques. Nous avons donné à la page 56 les détails du régime à imposer aux ouvriers sur les chantiers de ce genre.

La dépense en capital des travaux d'endiguement du Var s'est élevée à :

7,432,000 francs ;

on a créé une voie carrossable de 17 kilomètres, colmaté 500 hectares de gravier, préservé 1000 hectares d'alluvions d'une ruine imminente, assaini une val lée malsaine.

L'aliénation des 500 hectares, à 6000 fr. l'un, rapportera 3 millions à l'État ; la route représente un capital de 850,000 fr. ; la conservation et l'augmentation des impôts représentent un capital de 1,500,000 fr.

Les déboursés ne seront donc pas entièrement couverts ; mais on aura exécuté une grande œuvre d'utilité publique.

COLMATAGES DE LA VALLÉE DE L'ISÈRE.

Dans la partie supérieure de son cours, l'Isère traverse la Savoie ; il y a quarante ans, cette rivière n'avait pas encore de lit fixe et se déplaçait sans cesse dans la vallée ; elle anéantissait ainsi au point de vue de la culture une superficie de 3000 hectares.

Au moment de la fonte des neiges, les eaux se répandaient sur toute la vallée et les parties cultivées se trouvaient souvent recouvertes de pierres et de galets.

Lors de l'étiage, le courant serpentait dans les bras principaux, et il restait de toutes parts de grandes surfaces d'eau stagnante, des *brassières*, véritables marécages, funestes à la santé publique.

C'est en 1830 que le gouvernement piémontais entreprit des travaux d'endiguement aujourd'hui complets.

L'Isère est enfermée entre deux digues parallèles, dont l'écartement à l'étiage est de 100 mètres à l'amont du confluent de l'Arc et de 130 mètres à l'aval.

Ces digues, qui ne peuvent être qu'exceptionnellement surmontées, ont mis à l'abri les parties latérales de la vallée, qu'on peut aujourd'hui cultiver en sécurité. Mais ces parties sont restées au-dessous du niveau moyen des eaux de la rivière ; des filtrations importantes se produisent dans le sous-sol perméable ; les anciennes brassières restent marécageuses, l'écoulement des affluents se trouve suspendu par suite de la surélévation résultant de l'encaissement des eaux ; la situation, au point de vue hygiénique, est aussi mauvaise qu'autrefois ; on peut même dire qu'elle est pire, car c'est en été, lors des grosses eaux de l'Isère, que les eaux stagnantes atteignent leur volume maximum.

Pour transformer les bas-fonds, couverts en été de roseaux verdoyants, on a à sa disposition un moyen puissant : le colmatage produit par les troubles enlevés aux eaux de l'Isère.

Ce procédé, inauguré par les ingénieurs sardes, a reçu depuis 1860 une nouvelle impulsion de la part des ingénieurs français.

La pratique des colmatages de la vallée de l'Isère a été décrite dans un mémoire publié en 1868 par M. Drizard, conducteur des ponts et chaussées ; elle a été examinée dans son ensemble et au point de vue théorique dans un autre mémoire plus récent publié par M. l'ingénieur Choron. C'est dans ces deux écrits que nous avons trouvé les renseignements qui vont suivre :

La figure 2 planche XXV représente deux bassins de colmatage, l'un sur la rive droite, l'autre sur la rive gauche de la rivière, et en indique les dispositions principales.

Les digues latérales de la rivière, figure 3 planche XXV, sont formées d'un massif de gravier, sable et terre mélangés. Ce massif est recouvert à l'intérieur d'un revêtement de gros blocs de $\frac{1}{8}$ à $\frac{1}{3}$ de mètre cube ; le talus de ce revêtement est à 2 de base pour 1 de hauteur. Le talus extérieur, sans revêtement, est à la même inclinaison. La largeur en couronne est de 3 mètres au minimum.

La pente de l'Isère, dans la partie endiguée, est d'environ $0^m,0015$ par mètre.

Dans ces digues, on a ménagé, de distance en distance, en vue du colmatage futur, des prises d'eau. Ces prises d'eau sont des ponts en maçonnerie, barrés par 3 vannes de $1^m,20$ d'ouverture. Les figures 9 à 12 de la planche XXV en donnent l'élévation et la coupe en long.

On a eu le tort de placer les prises d'eau normalement au courant, car ce courant est rapide, et l'introduction de l'eau est défectueuse : le débit n'est pas ce qu'il devrait être eu égard à l'ouverture. On est forcé de construire en lit de rivière de petits enrochements qui dévient le courant.

Les eaux troubles sont donc introduites dans les bassins, bandes de terrain beaucoup plus longues que larges : pour maintenir les eaux à peu près uniformément partout, pour réduire le volume des eaux à employer et la hauteur des digues à construire, il a fallu fractionner ces bandes de colmatage en plusieurs bassins étagés suivant la pente de la vallée. Cette pente est, en effet, de $1^m,50$ par kilomètre, ce qui, pour une bande de 4000 mètres, représenterait de l'amont à l'aval une dénivellation totale de 6 mètres. Il faudrait alors, fig. 2 planche XXIII,

élever la digue extrême de la hauteur *cb* et introduire tout le volume d'eau correspondant à la section *abcd*. En fractionnant, au contraire, en trois bassins étagés, séparés par les digues *m*, *n*, *p*, transversales à la vallée, on reconnaît immédiatement qu'on diminue de beaucoup la hauteur des digues et le volume des eaux.

Les eaux troubles passent d'un bassin à l'autre au moyen de déversoirs ménagés dans les digues et le retour à la rivière des eaux clarifiées à la sortie du dernier bassin se fait au moyen de ponts déversoirs ménagés dans les digues, lors de leur construction, aux points supposés les plus convenables.

C'est par ces ponts déversoirs que les eaux des petits affluents entrent dans la rivière.

Les déversoirs entre les bassins sont construits en remblai de gravier, blocages et fascines comme le montrent les figures 4 à 8 planche XXV.

Le système adopté primitivement par les ingénieurs piémontais est représenté par la figure 7. Les piquets ont de 1m,50 à 3 mètres de hauteur avec des diamètres de 0m,07 à 0m,16 ; chaque étage de piquets soutient à l'amont un madrier en sapin de 0m,30 de hauteur sur 0m,10 d'épaisseur et ce madrier repose sur des lits horizontaux de fascines en épines ou en branches d'aulne ou de peuplier. Dans les coffres ainsi formés, on plaçait une épaisseur de 0m,30 de blocaille ou de cailloux. Les piquets faisaient au-dessus du madrier une saillie inutile de 0m,50. Ces déversoirs étaient établis aux points les plus bas.

Le système adopté par les ingénieurs français, figure 5, est plus simple et plus économique : les piquets n'ont que 1 mètre à 1m,50 avec des diamètres de 0m,07 à 0m,10.

La ligne supérieure seule soutient à l'amont un madrier en sapin ; les autres lignes soutiennent des boudins en branches d'aulne ou de peuplier, reliés par des harts avec les piquets. Les boudins ont 0m,25 à 0m,30 de diamètre ; les intervalles entre eux sont remplis avec de la blocaille, de 0m,15 d'épaisseur. Le pied du talus est protégé par un lit de fascines.

A l'ancienne série de chutes on a substitué un glacis continu.

Ce système a bien résisté, même lorsque les nappes de déversement atteignaient une hauteur de 0m,40. On ne s'astreint pas à choisir les parties les plus basses du terrain pour établir les déversoirs.

Les bourrelets d'enceinte et les turcies sont exécutés en remblai de gravier, sable et terre mélangés ; leur couronnement, établi à 0m,75 au-dessus du niveau futur du sol, a une largeur de 1 mètre à 1m,50 suivant la hauteur et les talus sont inclinés à $\frac{3}{2}$.

Chaque section d'atterrissement, comprenant un nombre plus ou moins grand de bassins, est en général alimentée par plusieurs prises d'eau, et à chaque prise d'eau correspond un groupe de bassins. Mais les eaux clarifiées du premier groupe tombent dans le second groupe et s'y mêlent aux eaux troubles qui y arrivent directement et dont la puissance colmatante se trouve ainsi réduite de moitié. Cette puissance est encore réduite dans le groupe suivant.

C'est donc une disposition très-vicieuse : les eaux devraient sortir claires du premier groupe de bassins, et tomber dans un canal de fuite, extérieur aux groupes suivants, canal qui recueillerait les eaux claires de tous les groupes de bassins et les conduirait à la rivière en un point situé à l'aval et assez éloigné pour qu'on obtienne la pente nécessaire à un rapide écoulement.

L'absence de ce canal extérieur qui recueillerait les eaux clarifiées et aussi

les eaux fournies par les versants de la vallée est la cause principale qui s'oppose au succès définitif des colmatages de l'Isère.

Un autre inconvénient est dans la disposition des ponts déversoirs ; ils se trouvent immédiatement à l'aval des sections de colmatage, de sorte qu'ils ne se prêtent à l'écoulement en rivière que lorsque les eaux sont basses. Ils cessent de fonctionner convenablement lorsque le niveau de la rivière s'élève, c'est-à-dire précisément à l'époque où les eaux sont le plus chargées de limon.

On est donc bien loin d'utiliser autant d'eau qu'on pourrait le faire et l'opération ne fait pas de progrès aussi rapides qu'elle le devrait.

M. Choron évaluait en 1871 à 180,000 francs les dépenses à faire pour compléter le colmatage de 650 hectares, valant 900,000 francs et susceptibles de prendre une plus-value minima de 800,000 francs.

Au point de vue économique, c'est donc une opération excellente, d'autant plus que les intérêts de la dépense sont couverts, pendant le colmatage, par le produit assez élevé de la vente des roseaux ou *blâches* qui croissent dans les bassins.

Dès les premiers temps du colmatage, on en a reconnu les excellents résultats et des terrains dénudés se sont couverts d'alluvions et de roseaux ; les roselières ou blâchères se sont sans cesse développées. La récolte de 1866 sur 600 hectares atteignait 2400 tonnes, qui ont été vendues 18,000 francs. Afin de faciliter la récolte des roseaux, on ménage dans les turcies de chaque bassin une vanne permettant de le débarrasser des eaux.

En six ans, une prise d'eau de 3 vannes, semblable à celle que nous avons décrite, suffit à produire une couche d'atterrissement de $0^{m},50$ sur 45 hectares, malgré les défectuosités du système.

Les plantes aquatiques se montrent spontanément dans les bassins la seconde année du colmatage, et, dès ce moment, l'eau se trouve dépouillée beaucoup mieux et beaucoup plus vite du limon qu'elle renferme.

La troisième année paraît le grand roseau (arundo phragmites) qui ne tarde pas à tout envahir et à étouffer les autres plantes; il active encore le dépôt des limons et les eaux qui passent dans le second bassin sont peu chargées.

La quatrième année, la formation des roseaux est compacte; ils atteignent 4 mètres de hauteur et clarifient complétement les eaux dès le premier bassin.

Aussi faut-il, l'année suivante, ouvrir à travers ce premier bassin un canal qui conduise directement une grande partie des eaux troubles dans le second bassin.

Cette étude des colmatages de l'Isère est intéressante ; elle montre qu'on aurait gagné un temps considérable et réalisé une opération beaucoup plus fructueuse si on avait exécuté dès l'abord les travaux d'après un plan d'ensemble conçu d'après les principes suivants : introduire en tout temps un volume d'eau aussi considérable que possible et ménager aux eaux claires ainsi qu'aux eaux des versants un écoulement aussi large et aussi rapide que possible.

CANAL DE CRAPPONNE. — COLMATAGE DE LA CRAU.

Le canal de Crapponne, dérivé de la Durance, a deux branches principales qui se terminent l'une à Arles, l'autre à l'étang de Berre, figure 1 planche XXV.

Le canal a été construit au seizième siècle; il est l'œuvre d'Adam de Crapponne, dont la vie, peu connue jusqu'ici, a été racontée par M. Félix Martin, ingénieur des ponts et chaussées, dans une notice insérée aux Annales de 1874, notice claire et intéressante qu'il faut lire en entier.

« Le nom même d'Adam de Crapponne, dit M. Martin, est presque ignoré en dehors du lieu de sa naissance et de la région qui, depuis plus de trois siècles, s'enrichit du fruit de ses travaux. La France a cependant produit peu d'esprits aussi éminents, peu d'hommes qui aient donné un plus bel exemple d'attachement inébranlable aux traditions de loyauté, de désintéressement et de droiture, auxquelles les ingénieurs français sont toujours restés fidèles. »

Adam de Crapponne naquit à Salon vers 1523; dès sa jeunesse, il fut attaché à la maison du roi Henri II dont il gagna la confiance; c'est en 1548 qu'il reçut de lui les lettres patentes lui accordant la concession d'un canal dérivé de la Durance.

La guerre l'appelle sur ces entrefaites et recule le commencement des opérations jusqu'en 1554; le 17 août 1554, un arrêt de la Chambre des comptes de Provence autorise Adam de Crapponne à « prendre l'eau en la rivière de Durance et à faire la prise escluse de la dite eau au terroir de Janson pour la conduire et dériver par un béal et fossé de la largeur et profondité que verra lui être nécessaire.... jusques et au-dedans du terroir de Saint-Chamaz pour le vuider à la mer, et à faire et construire de la dicte eau moulins, angins d'eau, usages et autres utilités qu'il se pourra adviser de faire à son proffict. »

Plaine de la Crau. — Le plus grand parti qu'on puisse tirer du canal de Crapponne est le colmatage de la plaine de la Crau. Voici d'après M. Félix Martin une description exacte et pittoresque de cette plaine :

« Il existe, dit-il, au sud et à l'ouest de la chaîne des Alpines une plaine qui s'étend jusqu'au Rhône : c'est la *Crau.*

Cette vaste étendue de terrain était autrefois entièrement aride et brûlante; Strabon la désignait sous le nom de *terram horridam ;* son aspect s'est beaucoup modifié, mais une partie de ce désert de cailloux subsiste encore parsemé d'oasis et bordé de plaines fertiles.

La géologie fait remonter la formation de la Crau à la période glaciaire. La masse de galets libres ou renfermés dans une gangue de boue durcie qui la recouvre, est sans doute le résultat d'une de ces formidables débâcles qui bouleversaient alors les parties inférieures des bassins.

Ce sont les matériaux accumulés dans les moraines et les terrasses de la vallée qui ont fourni les innombrables cailloux qui recouvrent la Crau. A cette époque, la Durance se jetait, non pas dans le Rhône, mais directement à la mer. (*Ch. Martins.*)

Ainsi qu'on l'a fait observer, du reste, la configuration topographique de la plaine montre bien que son origine n'est pas sédimentaire et que sa surface figure celle d'un cône de déjection.

Le cône de la Crau est parfaitement dessiné dans la carte de l'état-major. Il

forme un vaste triangle dont la base s'étend le long du Rhône, et dont les côtés, partant du sommet du cône, vers Lamanou, sont occupés par les deux branches du canal de Crapponne. (*Cezanne.*)

Le sol de la Crau est composé de deux couches correspondant à deux formations géologiques distinctes et appartenant l'une et l'autre à la période quaternaire. La couche superficielle est composée de cailloux quartzeux, disséminés dans un sable argileux et coloré ; son épaisseur maxima est de 1 mètre. La seconde formation est constituée par des cailloux que relie un ciment calcaire, ce qui produit un poudingue fort compacte formant un sous-sol presque imperméable.

« Rien n'est plus triste que la Crau inculte, dit un des auteurs qui l'ont le mieux étudiée au point de vue géologique et agricole; on n'y voit pas un arbre, pas même un buisson, mais seulement des cailloux roulés formant une nappe continue d'une étendue indéfinie. On se croirait au milieu d'un désert de l'Afrique. En été, c'est à peine si l'on y aperçoit quelques graminées clair-semées et jaunies. Au seizième siècle, on comptait 53,000 hectares de ce terrain aride et désolé. »

Sa transformation en un sol fertile et boisé fut le problème qu'Adam de Crapponne entreprit de résoudre à l'aide du colmatage produit par les eaux de la Durance.

Cette rivière est sans doute celle de la France qui se prête le mieux à une telle opération. Ses eaux proviennent de la réunion des torrents et ruisseaux des Hautes et Basses-Alpes qui sortent pour la plupart d'un calcaire marneux feuilleté, noir, très-friable, appartenant au lias. La corrosion des flancs dénudés de ces montagnes produit d'énormes masses de boues, qui, longtemps roulées, mélangées aux détritus végétaux, se transforment dans la partie inférieure de la vallée en un limon assez riche.

Description du canal. — Adam de Crapponne, sans avoir pu se rendre compte d'une manière précise de la richesse des limons de la Durance, avait su apprécier le parti qu'on en pourrait tirer pour le colmatage. Les nivellements lui avaient permis de constater que les eaux prises au pont de Cadenet pouvaient être conduites dans la Crau en traversant la chaîne des Alpines, par la coupure profonde près de laquelle se trouve le village de Lamanou, sans tunnel et sans travaux d'art importants. La plus grande difficulté technique consistait dans l'établissement de la prise sur la Durance ; nous verrons plus loin comment elle fut résolue.

L'idée d'appliquer les eaux de la Durance au colmatage de la Crau domine toute l'économie du projet de Crapponne : la pente moyenne de son canal est assez forte pour que la vitesse de l'eau atteigne et dépasse même à certains points 2^{m},50 par seconde. Aussi les limons arrivent-ils aux points les plus éloignés du réseau des canaux de distribution. Cette vitesse, excessive pour un canal, rend inutile son curage, opération si onéreuse dans les autres canaux dérivés de la Durance établis en vue des irrigations avec une pente très-inférieure à celle du canal de colmatage. Il est évident que si l'ingénieur avait construit ce canal plus spécialement en vue des irrigations, il eût ménagé sa pente de façon à arroser la plus grande surface possible des terrains situés à flanc de coteau, les seuls cultivés au seizième siècle dans toute cette région. Il n'en est rien ; la branche mère arrive au col de Lamanou juste au niveau du point le plus bas du col ; de là les branches secondaires divergent en suivant à peu près les génératrices du cône de déjection qui constitue la Crau. Crapponne n'a dérogé à cette

règle qu'en faveur du territoire de Salon, sa ville natale, dont il voulait faire profiter le territoire, dans toute la mesure du possible, du bienfait des arrosages.

Divers documents contemporains de Crapponne montrent qu'il avait l'intention arrêtée d'agrandir son canal pour en augmenter le débit. Mais tel qu'il a été construit, il pourrait déjà fournir les moyens de transformer la Crau en terre arable dans une période relativement restreinte. Le débit de ce canal, qui est aujourd'hui de 12 à 15 mètres cubes, pourrait être facilement porté à 18 mètres, soit 570 millions par an. La Durance, qui roule dans une année 12 milliards de mètres cubes d'eau, entraîne un poids total de limon de 17 millions de tonnes. En comparant les débits des diverses périodes de crue ou d'étiage aux poids des troubles que contiennent les eaux, on arrive à ce résultat très-rapproché de la vérité que si une prise à débit continu est faite sur la rivière, 1 mètre cube d'eau de cette prise contiendra en moyenne $1^k,105$ de matières solides en suspension. Le canal de Crapponne pourra donc charrier, dans une année, environ 630,000 tonnes de limon qui représentent 408,000 mètres cubes pouvant recouvrir 163 hectares d'une couche de terre arable de $0^m,25$ d'épaisseur. Ce canal aurait donc pu, depuis 320 ans, colmater 52,000 hectares, c'est-à-dire une superficie sensiblement égale à celle de la Crau. Il n'en a malheureusement pas été ainsi ; le quart seulement de cette plaine a été fertilisé, et le colmatage n'avance que fort lentement ; sans parler des abus qui se commettent dans les arrosages pendant la période d'été, les eaux d'hiver, les plus chargées de limon, sont perdues complétement.

Les considérations qui précèdent caractérisent le côté saillant de l'œuvre de Crapponne ; il ne sera pas sans intérêt d'entrer dans quelques détails sur la nature des travaux qui, chose importante à noter, furent exécutés par lui seul, avec ses seules ressources, dans une période de dix années.

La branche mère, dont le parcours est d'environ 33 kilomètres et dont le débit moyen est de $12^m,500$, peut contenir 15 mètres cubes. Elle part du pont de Cadenet pour arriver à Lamanou. Vers ce col, le canal se bifurque en deux branches : celle d'Arles, dont le débit est de 7 mètres cubes, et celle de Salon, qui débite $5^m,500$.

Cette dernière se divise à son tour, après un trajet de 5,911 mètres, en deux autres branches : celle dite de Salon, qui arrose sur 8,758 mètres les territoires de Salon et de Grans et se jette dans la rivière de la Touloubre ; puis la branche de Pelissane qui, après avoir arrosé le terrain de ce village, traverse la Touloubre, arrose les communes de Lançon, Cornillon, et se jette dans l étang de Berre, aux environs de Saint-Chamas, après un parcours de 22,913 mètres.

La branche d'Arles, à une distance de 7,150 mètres de son origine, donne naissance au canal d'Istres, dont la longueur totale est de 25 kilomètres, le débit de 500 litres par seconde, et qui va se jeter dans l'étang de Berre, après avoir mis en jeu des usines importantes. La branche d'Arles côtoie la Crau au nord, arrive à cette ville sur un aqueduc de cent vingt arches, et se jette dans le Rhône après avoir parcouru une longueur de 50 kilomètres.

L'œuvre de Crapponne se compose donc d'un développement total de canaux de 145,582 mètres, débitant de 15,000 à 500 litres par seconde, sans compter une longueur considérable de rigoles secondaires qui sont le complément du réseau des canaux de colmatage et d'irrigation.

La pente moyenne des branches principales serait de $0^m,0025$ par mètre s'il n'existait sur le parcours du canal de nombreuses chutes pour usines. En réalité, cette pente varie de 0,0015 à 0,0020.

Le profil transversal de tous les canaux présente cette particularité que la profondeur des parties en déblai ne dépasse pas 1 mètre. Aussi la largeur de la branche mère et des branches principales à fort débit est-elle hors de proportion avec cette profondeur restreinte. Cette disposition a dû être adoptée par Crapponne pour éviter des déblais coûteux dans le rocher de poudingue très-dur, difficilement attaquable à la poudre, qui forme le sous-sol de la Crau.

J'ai parlé plus haut de la prise sur la Durance : la solution adoptée par Crapponne est intéressante à étudier; elle est ingénieuse et simple, et jusqu'à ce jour on n'a rien trouvé de mieux pour alimenter les canaux qui en dérivent.

La Durance présente un caractère torrentiel qui rend son régime extrêmement irrégulier; elle en est à ce degré de transformation que M. l'ingénieur Surell, dans un ouvrage devenu classique, désigne sous le nom de *Période de divagation*, où les eaux cherchent la figure de la section et les inflexions du cours qui correspondent à la plus grande stabilité. « Le trait le plus saillant de cette rivière est de divaguer sur un lit plat, très-large, et dont elles n'occupent jamais qu'une très-petite portion. Ce n'est pas seulement la forme de la section fluide qui se modifie et dans laquelle se déplace de temps en temps le thalweg; c'est la masse tout entière des eaux qui abandonne son lit, le laisse tout à coup à sec, et se transporte dans un lit nouveau à une grande distance du premier. Ce qu'on appelle ici les délaissés de la Durance sont des plages qui se prolongent au loin, tantôt couvertes de cultures, le plus souvent stériles, et dont la largeur excède souvent 800 mètres.

Le régime de la Durance offre cette particularité que le déplacement de son lit n'a pas lieu seulement dans le sens horizontal, mais aussi dans le sens vertical. Vers la partie voisine de son embouchure, ce dernier mouvement est devenu presque insensible, mais il s'accentue lorsqu'on remonte dans la vallée; l'abaissement continu du lit de la rivière, longtemps contesté, est aujourd'hui un fait avéré; on ne peut l'attribuer aux endiguements, qui ont pris depuis cinquante ans une grande extension; il n'a cessé de se produire depuis l'époque où la prise du canal de Crapponne fut établie, c'est-à-dire depuis trois cents ans, ainsi que le prouvent les déplacements successifs de cette prise. Il est même permis de croire que cette inconstance du lit doit s'amoindrir avec le temps, et que la Durance en arrivera un jour à la période de *régime* où les eaux débordent et rentrent dans un lit invariable. L'analogie conduit à supposer que toutes les rivières ont, de même que les torrents, préparé leur régime par des périodes d'instabilité. Lorsqu'on considère les larges vallées dans lesquelles coulent la plupart des fleuves qui circulent à la surface du globe, lorsqu'on observe que le fond de ces vallées est plat, nivelé par les eaux, et entièrement formé par leurs alluvions, n'est-il pas permis de croire que tous ces cours d'eau ont eu, pendant une longue série de siècles, des divagations pareilles à celles que nous observons aujourd'hui sur la Durance? Mais peu à peu le champ des oscillations s'est resserré, ainsi qu'on le voit si bien sur les torrents, et comme ceux-ci aussi, ils ont fini par s'encaisser, tandis que la Durance et ses congénères, sorties de montagnes plus récentes, sont arrêtées encore aujourd'hui dans la deuxième période.

Le régime de la Durance était sans doute, au XVI[e] siècle, plus instable encore qu'aujourd'hui.

Crapponne, esprit éminemment pratique, comprit qu'il s'exposait à des mécomptes en cherchant à établir un ouvrage fixe dans un lit sujet à de continuelles variations. Il se borna à établir une prise latérale sur un point de la rive correspondant à une largeur normale de la Durance, et adopta un ensemble de

dispositions propres à assurer en toute saison l'alimentation de cette prise. On n'a pas eu d'amélioration à apporter à la pratique qu'il a inaugurée depuis plus de trois siècles, et, chose singulière, depuis Adam de Crapponne, la surveillance et l'exécution des travaux d'*introduction des eaux* (c'est l'expression consacrée) ont toujours été confiées aux mêmes familles. Les eaux sont déviées sur la prise à l'aide de barrages volants établis dans les bras de la Durance ; ces barrages sont formés, dans les parties de $0^{m},60$ de profondeur, par des piquets retenant un cours de fascines chargées de cailloux; dans les parties plus profondes, par des chevalets en bois reliés par des traverses moisées et supportant également des fascines. Ces chevalets sont d'autant plus rapprochés que la profondeur est plus grande; on en place quelquefois dans des fonds de 4 à 5 mètres. Ces barrages volants sont toujours placés obliquement au courant qui presse les fascines avec force contre les pierres et les chevalets. Il va sans dire que ces ouvrages exigent de continuelles réparations; mais leur rétablissement est peu coûteux; ce n'est qu'une question de main-d'œuvre, car les matériaux employés sont d'un prix peu élevé.

Telles sont les principales dispositions adoptées par l'ingénieur pour l'exécution de cette œuvre considérable. J'ai expliqué plus haut comment elle a été dénaturée dans une certaine mesure et détournée de sa véritable destination, ce qui explique qu'elle n'ait pas réalisé toutes les améliorations que Crapponne avait en vue. Les résultats obtenus n'en ont pas moins une grande importance; il est intéressant d'évaluer dans quelle proportion le canal de Crapponne a contribué à accroître la richesse de la contrée.

La superficie des terres colmatées est aujourd'hui de 13,000 hectares dont la valeur varie de 1,200 francs (terres arables) à 5,000 francs (prairies), tandis que celle des terres caillouteuses qui servent de pâturage, pouvant alimenter au plus deux brebis par hectare, est de 300 francs.

La plus-value du sol résultant du colmatage peut donc être fixée à près de 33 millions de francs. A ce chiffre, il faut ajouter l'augmentation de valeur d'environ 6,000 hectares transformés en prairies, dont le prix s'est accru de 3,000 francs, ce qui donne encore 18 millions; en tout plus de 50 millions, sans compter la richesse résultant des 33 usines établies sur le canal et ses branches et que les eaux de Crapponne mettent en jeu.

Cette plus-value devrait être triplée si, au lieu de chiffrer les résultats acquis, on tenait compte de ceux qu'on eût dû obtenir si le canal de colmatage avait réalisé toutes les améliorations qu'on eût pu en attendre en transformant en sol arable la plaine aride de la Crau. La description suivante donne une idée aussi exacte que pittoresque des résultats de cette transformation sur les points où elle est achevée. « Au milieu de la plaine, on remarque çà et là des parties cultivées, entourées de grands arbres au milieu desquels la ferme est cachée. On les désigne sous le nom de *mas* : ce sont les oasis de la Crau. Sans transition on passe de la plaine découverte, nue et brûlante, dans l'ombre fraîche et sombre des ormeaux et des peupliers séculaires, dont le pied baigne dans les canaux d'irrigation. A l'abri de ces arbres, tout réussit, car les eaux de la Durance, chargées du limon noir des terrains liasiques qu'elles traversent, sont portées jusqu'aux extrémités de la Crau. Les prairies défendues par les arbres à feuilles caduques contre l'ardeur du soleil en été et fumées par le pacage des moutons en hiver sont aussi vertes que dans le nord de la France. Le mûrier, le figuier, l'olivier, le cerisier et d'autres arbres fruitiers y prospèrent à l'abri du mistral, défendus par les rideaux de magnifiques cyprès qui bordent les

rigoles d'arrosement. Dans les mêmes conditions, les légumes prospèrent très-bien sur le sol nettoyé de pierres et réduit aux alluvions fertiles déposés par les eaux. »

Adam de Crapponne attaqua les travaux de son canal en 1554, et vendit pour les poursuivre tous les biens qu'il possédait. Il était abandonné de sa famille et de ses amis qui doutaient du succès ; seuls, Jeanne de Crapponne, sa sœur, et son beau-père, Antoine de Cadenet, le soutinrent énergiquement et lui vinrent en aide aux jours de l'infortune et du découragement.

En 1557, il voulut mettre l'eau dans la branche de Salon, mais les infiltrations absorbèrent tout le volume dérivé ; pas une goutte n'arriva jusqu'à Salon ; le malheureux ingénieur fut hué par tous ses concitoyens.

Il parvint à étancher son canal et l'inauguration solennelle se fit en 1559, les eaux arrivèrent à Salon en grande abondance. « Là, dit Nostradamus, tout le peuple assemblé, non pour voir enfanter une montagne avec moquerie et risée, mais comme au spectacle de quelque miracle nouveau, receut cette eau avec applaudissement, estonnement et joye autant incroyable que inespérée. En ce principalement que plusieurs sages avoient creu, voire mesmes semé, que Crapponne avait entreprins l'infaisable et l'impossible. »

Adam de Crapponne ne profita pas du succès, et la liquidation du passé lui enleva ses dernières ressources et le contraignit à hypothéquer l'avenir.

Cependant, en 1561, il commença la branche d'Arles qui fut achevée par d'autres, après sa mort, en 1585.

Les créanciers d'Adam de Crapponne recueillirent le profit de ses grands et utiles desseins.

Les dernières années de sa vie furent employées à préparer d'autres travaux ; c'est à lui qu'on doit attribuer la première conception du canal du Midi ; il eut l'honneur de dessécher les marais de Fréjus, œuvre que Nostradamus compare au travail d'Hercule, nettoyant « les estableries d'Augias, roi d'Élide. » Il dirigea les fortifications de Nice, s'occupa d'un projet de dessèchement et d'irrigation de la Camargue, et remplit, à la fin de sa vie, les fonctions d'inspecteur général des fortifications du royaume ; il paraît être mort à Nantes en 1576.

État de la question du colmatage de la Crau. — L'idée du colmatage de la Crau a été reprise dans ces dernières années ; le projet le plus récent est celui de M. l'ingénieur en chef Nadault de Buffon.

« Ce projet, présenté en 1874 à l'approbation de l'administration, comporte, dit M. Félix Martin, la création d'un canal de colmatage ayant un débit de 80 mètres cubes d'eau par seconde, qui, par suite de l'évaporation, des fuites et des filtrations, serait réduit à 72 mètres cubes. Ce canal aurait sa prise sur la rive gauche de la Durance à 600 mètres en aval du pont de Mallemort. Il se dirigerait de ce point sur la trouée de Lamanou et longerait ensuite la limite Est de la Crau pour contourner enfin le périmètre des marais à combler.

La prise en Durance se rapprocherait beaucoup du genre de celle de Crapponne. Elle serait formée de vingt vannes de $1^m,66$ de largeur, complétée par un barrage se composant d'un seuil en pieux, piquets, clayonnages et enrochements, sur lequel on établirait, si cela était reconnu nécessaire, un système de ...ses destinées à être levées progressivement pour régulariser le niveau des ...nes. Ces hausses seraient d'ailleurs complétement abaissées, soit à ... aux époques de fortes crues.

... commun de ce canal alimentaire aurait environ 20 kilomètres ; il se

subdiviserait d'ailleurs en canaux secondaires destinés à amener les eaux limoneuses sur la Crau et dans les marais de Fos. La section et la pente du canal principal sont déterminées de façon à assurer aux eaux une vitesse moyenne de $1^m,25$. Les canaux secondaires, au nombre de douze, auraient ensemble une longueur de 20,600 mètres; ils desserviraient douze bassins de 400 hectares dont chacun serait divisé en trois compartiments se remplissant alternativement tous les trois jours. Des dispositions très-étudiées assureraient l'écoulement à la mer des eaux de colature.

Telle est l'économie générale de ce projet, dont l'estimation est de 16 millions, et qui permettrait de colmater 20,000 hectares de terrains pierreux de la Crau, ainsi que 5,000 hectares de marais.

Sans se dissimuler combien l'exécution d'une telle entreprise présente de difficultés de toute nature, tant au point de vue technique qu'au point de vue administratif; malgré l'insuffisance de la loi de 1807 et l'absence totale de toute législation en ce qui a pour effet de contribuer aux assainissements, on peut affirmer qu'il n'est pas au-dessus des moyens dont nous disposons aujourd'hui de mener un tel travail à bonne fin. L'expérience du canal de Crapponne fournira du reste de précieuses indications, et, lors même que son exemple ne servirait qu'à mettre en garde contre les fausses manœuvres, à éviter les tâtonnements inséparables de toute tentative nouvelle, il aurait à ce seul point de vue une incontestable utilité. »

Colmatages près d'Avignon. — L'utilisation des eaux de la Durance a déjà été faite sur une moindre échelle; voici la description que M. l'ingénieur Comte donnait en 1850 des petits colmatages exécutés près d'Avignon: Les garrigues d'Avignon sont formées par un mélange de terre végétale et de cailloux; dès les premières années d'irrigation, l'ancien sol se recouvre d'une excellente couche de limon, et les vieilles prairies des garrigues de Montfavet ont acquis au-dessus de l'ancien sol une épaisseur de 30 à 35 centimètres d'excellente terre végétale.

Un habitant d'Avignon possède une propriété de 150 hectares presque entièrement composée de garrigues. Ce propriétaire dérive 400 litres d'eau par seconde du canal Crillon, et comme il est impossible de cultiver une aussi grande propriété en prairie, il a eu la pensée de créer des terres arables sur les cailloux de ces garrigues. Voici les procédés qu'il emploie.

La terre à colmater, planche XX, est d'abord entourée d'un fossé destiné à l'isoler des terres riveraines et à recevoir les infiltrations; les déblais du fossé servent à établir une chaussée qui s'élève à $0^m,70$ environ au-dessus de la terre à colmater. Ladite terre est ensuite coupée en zones a, a', a'', a''', a'''', a''''', de plus en plus petites au fur et à mesure qu'on s'éloigne du fossé qui doit fournir les eaux.

Ces zones sont formées par de petites chaussées; le couronnement de la première est à $0^m,50$ au-dessus du terrain et les autres sont disposées de façon que la terre conserve une inclinaison vers la direction a, a'''''; dans le chantier dont il est question, par exemple, le couronnement de la seconde chaussée est placé à $0^m,10$ en contre-bas de celui de la première et ainsi de suite, le couronnement de chaque chaussée étant placé à $0^m,10$ plus bas que celui de la précédente.

Les eaux sont introduites dans le compartiment a au moyen du fossé bb; lorsque ce compartiment est rempli les eaux sont déversées dans le compartiment a' par-dessus la chaussée $b'b'$; elles se rendent ensuite successivement

dans chacun des compartiments où elles déposent tous les troubles qu'elles tiennent en suspension; puis elles sont reçues dans le fossé *cc* où elles arrivent aussi claires que l'eau de roche.

Le premier compartiment *a* est bientôt colmaté; aussitôt qu'il a reçu la couche de terre qui paraît convenable, on creuse un fossé le long de la chaussée *b'b'* dans le compartiment *a* pour l'isoler du reste du chantier; on renforce cette chaussée, et le compartiment *a'* devient à son tour tête de colmatage.

On continue ainsi, jusqu'à ce que chacun des compartiments ait été suffisamment colmaté. Les divers compartiments *a*, *a'*.... recevant successivement les eaux, les dépôts les plus grossiers se font dans les premiers compartiments et les dépôts les plus ténus dans les derniers; chacun des compartiments recevant à son tour les eaux de première main, reçoit ainsi successivement les plus ténus et les plus grossiers, et les charruages mélangent parfaitement les diverses natures de serres.

Lorsque les terrains n'ont pas beaucoup d'inclinaison, les petites chaussées *b'b''b'''*, etc., sont alors au même niveau; sur la fin de l'opération, on fait arriver les eaux par les deux extrémités opposées, et le choc des deux vitesses opère parfaitement le mélange des dépôts.

La chaussée *cc*, la dernière du chantier, est placée à 4 ou 5 mètres du bord environ. Les charruages annuels amènent sur cette partie la portion de terre qui lui est nécessaire pour participer à l'amélioration dont le terrain a été l'objet, et cette disposition permet de favoriser l'écoulement des eaux pluviales.

Le colmatage une fois terminé, on laboure la terre au moyen de la charrue à dix colliers qui enlève les chaussées, comble les fossés, nivelle le terrain et mélange les diverses couches amenées par le colmatage.

Il est une précaution indispensable pour empêcher les colmatages d'être des foyers d'infection. C'est de veiller à ce que la couche d'eau répandue sur le terrain ait au moins $0^{m},50$ d'épaisseur; car sans cela, cette eau presque stagnante s'échauffe aux rayons solaires et entraîne la décomposition des végétaux qui poussent sous l'eau. C'est pour arriver à ce résultat que la terre à colmater est divisée en petits compartiments; car lorsque le premier compartiment est près d'être colmaté, l'eau qui passe dans ce compartiment est animée d'une vitesse plus grande que lorsque le colmatage commence; elle entraîne donc une grande partie des troubles qu'elle tenait en suspension; mais ces troubles se déposent dans les compartiments suivants. Si on n'avait qu'un seul compartiment, les troubles que l'eau entraînerait à la fin de l'opération seraient perdus, ou bien il faudrait réduire la quantité d'eau à amener dans le compartiment, ce qui serait nuisible à la salubrité de la contrée.

L'absence des troubles et la nécessité d'employer les eaux aux irrigations réduisent à quatre mois l'espace de temps pendant lequel on peut appliquer les eaux aux colmatages. La surface colmatée qui nous occupe est de 9 hectares en 3 ans, ce qui fait 3 hectares par an ; la couche du limon apportée sur le terrain ancien est de 50 à 70 centimètres. La dépense par hectare est de 450 francs. Les bénéfices sont énormes puisqu'on transforme des terrains qui valent 1200 fr. l'hectare en terres à blé de 7000 fr., et qu'en outre cette terre porte sept ou huit récoltes de blé sans qu'il soit nécessaire d'y mettre aucun engrais.

Une grande partie du territoire d'Avignon pourrait être soumise à cette opération ; mais la propriété y est si divisée qu'il serait impossible de former une association volontaire entre les divers propriétaires de garrigues.

Mais ce qui serait au moins très-difficile dans les plaines d'Avignon, serait d'une grande facilité dans les immenses déserts de la Crau. L'eau de la Durance y arrive, il n'y aurait qu'à agrandir les canaux pour augmenter le débit pendant l'hiver, et l'on pourrait avec 50 mètres cubes d'eau créer annuellement 300 hectares de terres labourables.

ALLUVIONS DE LA BASSE SEINE.

Les travaux d'endiguement de la basse Seine ou Seine maritime ont été entrepris en vue d'améliorer la navigation entre le Havre et Rouen.

A ce point de vue, ils ont produit de bons résultats, mais ce ne sont point de ces résultats que nous voulons nous occuper ici. En traitant de la navigation fluviale, nous examinerons complétement la question de l'endiguement et nous décrirons les procédés en usage pour l'établissement des digues submersibles ou insubmersibles.

Dans cette partie de notre ouvrage nous n'avons à parler que des résultats agricoles dus à l'endiguement de la basse Seine.

Ces résultats accessoires de l'opération principale ont néanmoins une importance telle qu'à eux seuls ils justifieraient l'utilité publique du travail entrepris.

On a resserré le courant entre les deux digues longitudinales et on a substitué ainsi un chenal fixe à l'ancien chenal mobile qui se tenait tantôt sur l'une, tantôt sur l'autre rive; autrefois, dans une seule marée, des prairies d'une grande valeur étaient arrachées et entraînées par les flots. Les digues ont mis à l'abri de ces ravages l'excès de largeur de l'ancien lit; les bancs de sable et de vase ont été enlevés entre les digues par la force des nouveaux courants, et ces matières solides tenues en suspension par les eaux se sont déposées derrière les digues dans les parties tranquilles.

Ces alluvions n'ont pas tardé à se couvrir d'elles-mêmes d'excellentes prairies.

De 1846 au 1er janvier 1867, l'exécution des digues de la Seine maritime a entraîné une dépense de 13,500,000 francs.

Voici, d'après la notice présentée à l'Exposition universelle de 1867, les résultats obtenus au point de vue du colmatage :

L'exécution des endiguements de la basse Seine a donné naissance à des dépôts de sables vaseux en dehors des digues, dépôts qui se sont élevés rapidement au niveau des pleines mers de vive eau et qui, grâce à une puissante végétation, se sont transformés en prairies d'une valeur importante.

Leur surface est d'environ 8600 hectares détaillée au tableau suivant :

DÉSIGNATION DES LIEUX.	DÉPARTEMENTS.		SURFACE TOTALE.	OBSERVATIONS.
	SEINE-INFÉR.	EURE.		
RIVE DROITE.	hect.	hect.	hect.	
De la Mailleraye à Villequier. . . .	93,00	»	93,00	
De Villequier à Tancarville.. . . .	2020,98	»	2020,98	
De Tancarville au Hode..	3169,20	»	3169,20	
RIVE GAUCHE.				
De la Mailleraye à l'île de Belsinac.	108,00	»	108,00	
De l'île de Belsinac à Quillebœuf..	359,25	14,84	374,09	
De Quillebœuf à la pointe de la Roque	»	2313,00	2313,00	
De la pointe de la Roque à Berville.	»	522,90	522,90	
	5750,43	2850,74	8601,17	

Le prix de ces prairies est en moyenne de 2500 fr. l'hectare, leur valeur réelle est donc de 21,500,000 francs.

Toutefois, l'État a admis que ces terrains devaient être considérés comme appartenant aux riverains à titre d'alluvions, en vertu de l'art. 556 du code Napoléon, et il s'est contenté d'appliquer le principe de la plus-value, inscrit dans la loi du 16 septembre 1807. Deux décrets, ceux du 15 janvier 1853 et juillet 1854, ont déclaré applicables aux alluvions des départements de la Seine-Inférieure et de l'Eure, les articles 30, 31 et 32 de cette loi.

Les indemnités payées par les propriétaires s'élèvent à la somme totale de 1,288,934 fr. 14 c.; elles ont été réglées « à la moitié de la valeur des avantages que les propriétés avaient acquis » au moment de la remise.

Il reste à recueillir les indemnités de plus-value relatives aux alluvions situées sur la rive gauche en aval de Quillebœuf et sur la rive droite en aval de Tancarville ; elles pourront s'élever à une somme de 2,500,000 francs.

Les indemnités à payer à l'État formeront ainsi un total de 3,800,000 francs environ.

Provenance des alluvions de la basse Seine. — Quelle est la provenance des alluvions de la basse Seine? Sont-elles dues aux sables et aux vases enlevés par la mer sur toute la côte normande? Sont-elles dues, au contraire, aux matières arrachées par le fleuve dans les parties supérieures de son cours?

M. l'ingénieur Marchal a présenté à l'appui de la première thèse des motifs bien déduits que nous rappellerons sommairement.

Les alluvions produites par les fleuves à leur embouchure dans des mers sans marée, comme la Méditerranée, sont bien un produit fluviatile, on ne saurait le nier.

Mais, la question peut être discutée et diversement résolue pour les fleuves qui débouchent dans des mers à marées puissantes, comme l'Océan et la Manche.

La Loire, alimentée par des bassins imperméables et douée de fortes pentes dans son cours supérieur, affecte des allures torrentielles; aussi charrie-t-elle de gros sables jusqu'à son embouchure et il y a, entre Nantes et Saint-Nazaire, une combinaison des apports fluviatiles et des apports marins.

La Seine a des allures toutes différentes et la quantité de matières solides

qu'elle apporte dans la baie est incomparablement moindre, dit M. Marchal, que celle qui y est amenée par les courants du littoral.

M. l'ingénieur Beaulieu disait vers 1850 : « A en juger par la limpidité habituelle des eaux de la Seine proprement dite et par le trouble des eaux de la marée, il n'est pas douteux pour nous que la majeure partie des dépôts nouvellement formés derrière les digues ne provienne des sables de la baie. »

M. Marchal compare entre elles la composition chimique des alluvions de la basse Seine et la composition des tangues de la baie du Mont Saint-Michel et de la baie des Veys :

Les substances qui dominent dans les tangues du Mont Saint-Michel sont la silice et le carbonate de chaux; à mesure qu'on s'avance dans la mer, la proportion de silice augmente, et, à mesure qu'on s'avance vers la terre, c'est la proportion de calcaire qui augmente. Or, les bassins des trois rivières qui débouchent dans la baie sont dépourvus de calcaire, ainsi que les côtes voisines de la Manche et de la Bretagne : on reconnaît en effet à la loupe que le calcaire se compose de débris de coquilles; ainsi l'élément calcaire vient du fond de la rade de Cancale et il en est de même du sable, car le débit des rivières de la baie est trop faible pour l'expliquer.

Ces faits montrent que dans le sein de la mer, il se fait une puissante trituration de matières sablonneuses et calcaires, que le tout est porté par le flot dans les anses, baies et embouchures, et s'y dépose lorsqu'il trouve du calme ou une force contre-balançant l'action du jusant.

La présence du calcaire dans les alluvions de la Seine ne prouverait rien puisque ce fleuve coule presque partout entre des coteaux calcaires.

Mais, à Rouen, on ne trouve dans l'eau du fleuve que de la vase avec peu de sable ; à Quillebœuf, près des digues, la proportion de sable est beaucoup plus forte.

Ainsi, le sable provenant de la haute Seine n'arriverait pas jusqu'à Rouen, et celui qu'on trouve dans les alluvions provient de la mer.

En ce qui touche la partie calcaire des dépôts, on reconnaît à la loupe qu'elle résulte de la trituration de coquilles; elle paraît donc avoir aussi une origine marine.

La partie vaseuse pourrait provenir du fleuve; mais, si on remarque que cette partie vaseuse se dépose dans les bassins des ports de la côte soustraits à toute influence fluviale, on reconnaît que la plus grosse portion de ces dépôts vaseux doit, elle aussi, provenir des eaux de la mer.

Le courant du littoral ronge sans cesse et creuse en courbes concaves les rives de la Manche; chaque année les falaises sont minées et reculent dans les terres ; le recul annuel paraît être en moyenne de $0^{m},30$ dans la Seine-Inférieure ; la corrosion exercée du cap de Barfleur à Calais et de l'île de Wight à Douvres se chiffre chaque année par au moins 10 millions de mètres cubes; 1,500,000 environ se présentent à l'entrée de la Seine et en remontent le cours; les galets s'arrêtent d'abord, les sables dépassent Quillebœuf, les vases suivent le flot jusqu'à Rouen et au-dessus et reviennent avec le jusant sauf la partie qui se dépose derrière les digues.

De l'eau puisée dans la Seine à Rouen pendant le jusant, à la suite d'une longue crue du fleuve, ne déposait par litre que $0^{gr},045$ de matière solide par litre, tandis que celle qu'on prenait à l'étale, le même jour, abandonnait par litre un dépôt de $0^{gr},145$.

Ainsi, d'après M. Marchal, les alluvions de la basse Seine auraient une origine

